LEO BABIĆ

PRIMJENA BETONA KOD RADOVA U MORU

TEHNIČKA KNJIGA
ZAGREB 1964

21883

Ing. LEO BABIĆ

PRIMJENA BETONA KOD RADOVA U MORU

Stampa: Izdavačko-štamparsko preduzeće »Obod« — Cetinje

Ing. LEO BABIĆ

PRIMJENA BETONA KOD RADOVA U MORU

DJELOVANJE MORSKE VODE NA BETON
IZRADA OTPORNOG BETONA

TEHNIČKA KNJIGA
ZAGREB, 1964.

Ovu knjigu posvećujem svom pokojnom ocu, koji je cijelog života istraživao tajne zbivanja Jadranskog mora.

Autor

S A D R Ž A J

	Strana
Predgovor	9
Uvod	11
Historijat veznih sredstava	13
Portland-cement	16
Specijalne vrste cemenata za radove u moru	26
Pucolani	33
O kvaliteti vode za miješanje betona	41
Različite vrste agregata za beton	47
Granulometrijski sastav agregata	60
Separacija krupnijeg agregata i pijeska na gradilištu	72
Alkalno-agregatna reakcija betona	74
Plastifikatori i ostali dodaci	77
Aerirani beton	83
Dodaci za povećanje nepropusnosti betona, te zaštitni premazi proti prodiranja vode u masu betona	88
Betoniranje za hladna vremena	90
Vibriranje betona	92
Torkretiranje	102
Injiciranje	112
Betoniranje pod morem	117
Ugrađivanje kontraktorom	119
Prepakt- odnosno kolkret-metoda izrade betona	124
O vjetrovima jadranskog pojasa	132
O morskoj vodi i njenim silama agresije	135
Djelovanje morske vode na beton	140
Izluživanje slobodnog vapna iz betona	144
Općenito o betonu za pomorske radove	146
Izrada betona za podmorske radove	148
Korozivno djelovanje morske vode na čelik armiranog betona	158
Zaključni pregled izbora vrste cementa i izvedbe otpornog i trajnog betona za radove u moru	163
Propisi za cemente koji se mogu upotrebljavati za pomorske radove	166
Oglasni dio	169

PREDGOVOR

Ovo djelo u svojoj razradi podijelio sam u dva dijela. Prvi svezak obuhvaća teoretska razmatranja o djelovanju i reagiranju cemenata, agregata, vode itd. za vrijeme pripreme vezanja i stvrdnjavanja betona. Obuhvaćeno je i djelovanje morske vode na beton, različiti načini ugradbe betona, te izrada otpornih i trajnih betona za podmorske radove.

Drugi svezak obuhvatit će u prvom dijelu djelovanje valova na pomorske objekte, a drugi dio obradit će same betonske pomorske građevine i to:

obalne gravitacione zidove, lukobrane itd.;
betonske i armirano-betonske konstrukcije na pilotima;
navoze, plivajuće i suhe dokove.

Budući da su podmorski radovi najčešće obimni i skupi, od njih se traži da budu trajni i otporni, jer njihova solidna izvedba ima i velik privredni značaj. To su razlozi zbog kojih upravo kod pomorskih radova moramo koristiti sva najnovija naučna iskustva, koja će doprinijeti izradi trajnih betona, uz maksimalne uštede materijala i radne snage.

Smatram svojom dužnošću da se ovdje napose zahvalim redovnom profesoru dr ing. V. Juranoviću koji mi je mnogo pomogao svojim stručnim savjetima, naročito iz područja tehnologije betona, i izvršio stručnu recenziju rukopisa.

Isto se tako zahvaljujem i redovnom profesoru dr L. Mariću koji je pregledao rukopis i stručno me savjetovao u pitanjima koja zasijecaju u petrologiju i mineralogiju.

Nadalje se zahvaljujem na velikoj pomoći svojoj drugarici Vili koja mi je pomagala u prevođenju, prepisivanju i korekturi, te svom sinu Borisu koji je izradio sve crteže u knjizi.

Na kraju odajem priznanje i Udruženju »Jucema«, te njenom direktoru drugu Kegleviću, koji su mi stavili na raspolaganje sve potrebne podatke o našoj cementnoj industriji.

AUTOR

UVOD

Procesi koji se zbivaju u betonu za vrijeme njegovog vezanja, stvrdnjavanja, a i kasnije, još uvijek nisu potpuno razjašnjeni. Unatoč mnogobrojnim ispitivanjima s najmodernijim elektronskim mikroskopima, rendgenskim spektroskopima itd., čime su mnoga od tih zbivanja razjašnjena i približena našem oku, još uvijek postoje područja u tim procesima o kojima samo nagađamo i pretpostavljamo. Uvodeći u te procese još i djelovanje pucolana ili zgure nailaze nova pitanja na koja nemamo tačnih odgovora, već opet samo pretpostavke o do danas neriješenim problemima.

Da možemo razumjeti sva ta međusobna djelovanja i reagiranja smatrao sam da u prvom redu moramo upoznati sve materijale s kojima se susrećemo pri izradi podmorskog betona, njihove karakteristike, te reagiranja u danim okolnostima.

I korozija morske vode na beton problem je oko kojega se već decenijama vode žučne polemike, često sasvim suprotnih gledanja. Danas već znamo koje sile korozije djeluju na beton, znamo i kako beton reagira u konačnici na tu agresiju, ali sve one fizikalne, odnosno kemijske procese, i sve one transformacije koje prelazeći jedne u druge i jedne iz drugih, još uvijek potpuno ne poznamo.

Nastojao sam sakupiti domaća i strana iskustva, i rezultate naučnih ispitivanja da bismo čim lakše i sigurnije mogli izvoditi u moru trajne objekte od betona. Sve što danas znamo o tim problemima ne treba smatrati aksiomima. To je samo tačka do koje smo stigli na putu ispitivanja i saznanja. Upoznavši taj put treba stalnim ispitivanjima, proučavanjem i praćenjem svega novog i naučnog primjenjivati to u praksi.

Poteškoća je još u tome što dva betona izrađena od dva cementa istog imena, ali različita mineraloškog sastava, mogu vrlo različito reagirati. Isto se tako dva betona izrađena od istog cementa, ali različitog agregata, mogu također različito vladati. Ako bismo tako dobivene specifične rezultate bez daljnjeg provjeravanja uopćavali, lako bi nas to dovelo do krivih zaključaka. Takvi slučajevi vrlo su česti pa ih se treba čuvati.

Izrada trajnog i otpornog betona za pomorske radove vrlo je kompleksan zadatak. Potrebna je uska suradnja kemičara, geologa-petrografa i građevinskih inženjera. Njihova suradnja mora da bude takva da kemičar i petrograf nastoje pomoći i riješiti probleme koje im postavi građevinski inženjer, a on opet da razumije i osjeti važnost njihovih traženja.

Ako sam ovom knjigom uspio uvjeriti graditelje naših luka i obala da je takva suradnja osnovna i neophodna zadovoljan sam, jer iz takve će stručne suradnje proisteći i sve ostale dobre posljedice stručnog i naučnog rada.

Na kraju ovog uvoda napominjem da sam oznake veličina i jedinica provodio prema JUS A. Al.040/1957.

Kao što je gram jedinica za masu, tako je pond odgovarajuća jedinica za silu.

1 kilopond je sila koja tijelu mase 1 kilograma daje akceleraciju od 9,80665 m/s^2.

Upotrebom prefiksa za povećanje, odnosno smanjenje jedinica označavao sam:

mp = milipond (faktor smanjenja 10^{-3})
p = pond
kp = kilopond (faktor povećanja 10^3)
Mp = megapond (faktor povećanja 10^6).

HISTORIJAT VEZNIH SREDSTAVA

Naziv cement dolazi od latinske riječi caementum, što znači lomljeni kamen. Tim imenom nazivala su se ona veziva koja su imala osobinu da se pomiješana s vodom, nakon nekog vremena stvrdnu kao kamen. Izraelci su za radove pod vodom i morem upotrebljavali kao vezno sredstvo mljevenu opeku, koju su dodavali vapnenom mortu. Grci i Rimljani poznavali su santurinski tuf, odnosno vulkanski pepeo, koji su miješali s vapnom i tako stvarali pucolansko vezivo. Još danas se dobro drže malteri koji su bili potopljeni u moru oko godine 250. prije naše ere. Pucolan je dobio svoje ime po mjestu Pozzuoli koje se nalazi u napuljskom zaljevu ispod Vezuva, gdje se najprije počeo kopati vulkanski pepeo za spomenutu upotrebu.

Čitav niz građevina koje su podigli stari Grci i Rimljani, a stoje još i danas, najbolji su dokaz da su pucolanski cementi trajniji od vapna.

Srednji vijek ne donosi u tom području građevinarstva nikakav napredak, naprotiv, moglo bi se reći da je došlo do nazatka, jer je pucolan kao takav zaboravljen. Tek u XV stoljeću pojavljuje se ponovo pucolan, koji se dodavao kao agregat vapnu. Polovinom XVIII stoljeća engleski inženjer Smeaton nakon niza ispitivanja dolazi do saznanja da nečisti meki vapnenci, koji sadrže glinaste primjese, daju s pucolanom najbolji hidraulički cement.

Početkom XIX stoljeća počinju se u Engleskoj i Francuskoj, na osnovi ispitivanja Parkera, Vicata itd., graditi tvornice cementa, koje su proizvodile cement od vapnenca i gline, odnosno ilovače. Otprilike u isto vrijeme počela je izgradnja tvornica cementa i u SAD.

Isprva se taj cement nazivao roman-cementom, jer je po boji sličio starom rimskom cementu.

Paralelno je utvrđeno da se pečenjem cementnog lapora ili tupine baš onakva sastava kakav je potreban za izradu portland-cementa, dobiva vezni materijal koji je nazvan prirodnim cementom. Beton izrađen s prirodnim cementom bio je čvršći od onog u kojem je spojno vezivo bilo od hidrauličnog vapna.

Karakteristike prirodnog cementa ovise o sastavu lapora koji se kopao kao sirovina, pa se u mnogim zemljama brani da ga se naziva portland-cementom.

U daljem razvoju produkcije cementa pojavljuje se portland-cement, čijim se pronalazačem smatra engleski zidar Aspdin (1811. g.).

Budući da je stvrdnuti portland-cement ličio građevnom kamenu koji se nalazio u Portlandu u Engleskoj, dali su tom novo dobivenom veznom materijalu ime portland, koje se zadržalo do današnjih vremena.

Englez Johnson došao je nakon dugog ispitivanja do pravilne receptu-re i načina proizvodnje, pa je od 1848. god. počelo po čitavom svijetu podizanje tvornica portland-cementa i daljnje usavršavanje njegove produkcije.

Prva tvornica cementa u Jugoslaviji sagrađena je na otoku Sv. Andrija kod Rovinja već 1852. god. Kasnije se ta tvornica preselila u Rovinj, ali je nakon toga ubrzo prestala s radom. Beočinska tvornica cementa sagrađena je između 1860. i 1870. god., a zatim su se počele graditi tvornice u Splitu i okolici, te u Sloveniji, u Trbovlju, itd. Danas se u Jugoslaviji proizvodi cement u 16 tvornica. U svijetu se proizvodi godišnje blizu 300 miliona tona cementa, od čega više od polovice otpada na portland-cement. U Jugoslaviji se godišnje proizvodi oko 2 388 000 t cementa. Kako se naša cementna industrija sve više jača i proširuje, jer su potrebe za cementom sve veće, uskoro će se ta proizvodnja znatno povećati.

Pregled proizvodnje cementa u Evropi, te utrošak po stanovniku u 1958. godini

Tablica 1

Država	Proizvodnja u milionima tona		Potrošnja po stanovniku u kilogramima	
	1958.	1959.	1958.	1959.
Švicarska	2,17	2,66	417	508
Zapadna Njemačka	19.88	23,88	373	445
Belgija i Luksemburg	4,15	4,46	328	344
Austrija	2,15	2,42	308	332
Norveška	1,01	1,10	271	299
Francuska	13,74	14,15	283	293
Italija	12,66	14,27	260	289
Danska	1,07	1,38	196	255
Holandija	1,37	1,60	224	251
Engleska	11,95	12,80	207	224
Španija	4,82	5,22	163	175
SFRJ	1,95	2,21	87,5	97,5
Turska	1,52	1,73	58	65
Čehoslovačka	4,11		301	
Istočna Njemačka	3,56		201	
SSSR	32,30		159	
Mađarska	1,30		132	
Bugarska	0,93		115	
Albanija	0,08		52	

Iz tablice 1 vidimo da se Jugoslavija nalazi pri dnu evropskih država u potrošnji cementa po stanovniku. Iako se prikazana potrošnja odnosi na 1958. i 1959. g. redoslijed se u našu korist nije popravio ni danas. Naša cementna industrija još nije našla pravo mjesto koje joj po važnosti pripada.

Da se vidi napredak u našoj cementnoj industriji navodim da je proizvodnja cementa kod nas u 1960. porasla na 2,388 miliona tona, dok je u 1961. došlo do neznatnog pada proizvodnje na 2,385 miliona tona. Potrošnja po stanovniku 1960. iznosila je 118,5 kg, a 1961. 125,5 kg. Ovo povišenje, unatoč smanjenoj proizvodnji, proizlazi od povećanog uvoza cementa u 1961.

Razvoj građevinarstva, koji je svake godine sve veći, te proizvodnja sve kvalitetnijih cemenata, pridonijet će jačem plasiranju naših cemenata i na vanjskom tržištu. Time će se stvoriti uslovi da i naša proizvodnja cementa dosegne evropski nivo, jer kvalitetnim sirovinama i ostalim uvjetima naša industrija obiluje u velikim količinama.

Budući da je portland-cement danas najvažnije vezno sredstvo za izradu betonskih radova, te igra jednu od najznačajnijih uloga u građevinarstvu, pozabaviti ćemo se u narednim poglavljima naročito svojstvima toga cementa.

Prema privremenim Jugoslovenskim standardima za cemente, izrađenim na osnovi protland-cementnog klinkera, predviđa se ova produkcija:

Portland-cement 250
Portland-cement 350
Portland-cement 450
Portland-cement s dodatkom zgure do 30%
Metalurški cement s dodatkom zgure preko 30%
Portland-cement s dodatkom pucolana do 40%
Pucolanski cement s dodatkom preko 40% pucolana
Cement 150

Vidimo da se uz portland-cement predviđa i izrada metalurškog cementa, te cemenata s dodatkom pucolana, odnosno zgure. To su cementi koji nas naročito interesiraju u vezi s hidrotehničkim radovima, koliko po svojim karakteristikama otpornosti, toliko i po povoljnijim cijenama.

Nažalost, razvoj produkcije, a i potražnja tih cemenata, u nas su još vrlo slabi. Je li slaboj potražnji kriva mala produkcija, ili obratno, ne može se tačno ustanoviti. Trebalo bi svakako i na ovom području krenuti energično naprijed, jer tu bi svoj interes našlo naše građevinarstvo, industrija cementa, a i čitava zajednica.

PORTLAND-CEMENT

Da bi se mogla razumjeti bit korozivnih pojava betona potrebno je znati od čega se beton proizvodi, koji su njegovi sastavni dijelovi, i kakve reakcije nastupaju za vrijeme vezanja i stvrdnjavanja. Bez poznavanja svih tih pojava i njihovih uzroka ne može se tehničar snaći u svim tim zbivanjima, niti može pravilno izabrati onaj i onakav cement s kojim će moći izgraditi trajne i otporne građevine u moru.

Prema našim standardima »portland-cementni klinker sastavljen je većim dijelom od silikata kalcija i dobija se pečenjem homogenih mješavina sirovina određenog sastava, koje uglavnom sadrže kalcijev oksid, silicijev dioksid, a u manjem razmjeru aluminijev trioksid i ferioksid.«

Sirovina za izradu portland-cementa u osnovi je mješavina vapnenca i gline u određenim proporcijama, da se osigura pravilan odnos pojedinih kemijskih spojeva.

Od vapnenastih materijala koji se nalaze u prirodi najčešće se upotrebljavaju vapnenac, tupina, lapor itd., a od glinastih glina, škriljevac, les itd.

Da dobijemo jasniju sliku o kemijskom sastavu tih osnovnih sirovina dajem u tablici 2 tipičnu kemijsku analizu sastava vapnenca i gline.

Tablica 2

Vapnenac		Glina	
SiO_2	2,5	SiO_2	58,2
Al_2O_3	1,5	Al_2O_3	18,4
Fe_2O_3	0,3	Fe_2O_3	9,3
$CaCO_3$	94,5	CaO	3,3
$MgCO_3$	1,2	MgO	3,9
		SO_3	1,2
		Alkalije	4,2 . . . 5
		Gubitak žarenjem	1,5
	100 %		100 %

Već prema tome kakav je tačan kemijski sastav izabranih osnovnih sirovina i kakav portland-cement želimo dobiti (normalan, brzo ili sporostvrdnjavajući, otporan prema sulfatima itd.) odlučujemo se za potrebno proporcioniranje tih sirovina.

Taj materijal treba dobro usitniti na ispravnu finoću i mora da bude dobro homogeniziran. Tako pripremljenu sirovinu peče se do klinkerizacije

u rotirnoj peći, na temperaturi oko 1450 °C, tj. na temperaturi početnog taljenja, i tako dobivamo klinker portlanda.

Klinker ima oblik grudica, veličine promjera 1 mm do 1 cm, a sivkastozelenkaste je boje.

Glavni sastavni dijelovi klinkera jesu spojevi vapna s oksidima silicija, aluminija i željeza i to:

trikalcijski silikat	$3\,CaO \cdot SiO_2$
bikalcijski silikat	$2\,CaO \cdot SiO_2$
trikalcijski aluminat	$3\,CaO \cdot Al_2O_3$
tetrakalcijski aluminoferit	$4\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$

Osobine cementa zavise od količine gornjih spojeva i njihovih proporcija u klinkeru, te od finoće mljevenja klinkera.

Kako su glavni minerali klinkera uvijek isti, zbog pojednostavnjenja uvedene su ove skraćene oznake:

za CaO	C
SiO_2	S
Al_2O_3	A
Fe_2O_3	F
MgO	M
H_2O	H

Treba međutim napomenuti da karakteristike cementa ne ovise samo o zbroju osobina gornjih spojeva, već se tu odigravaju i vrlo kompliciranI procesi među njima samima, no taj problem do danas nije potpuno riješen i razjašnjen, te se još uvijek ispituje.

Trikalcijski silikat (alit) sačinjava 40. . .60% težine jedinice cementnog klinkera, a označuje se i sa C_3S.

Izgleda da se kod taljenja sirovine u rotirnoj peći najprije spajaju Al_2O_3 i Fe_2O_3 s vapnom, a nakon toga se stvara bikalcijski silikat. On tada prima još jednu molekulu vapna i pretvara se u trikalcijski silikat. Trikalcijski silikat je glavni sastavni dio portland-klinkera, a njegovo je svojstvo da djeluje na brzo stvrdnjavanje, naročito u prvo vrijeme, tj. u prvih 28 dana. Uz trikalcijski aluminat on je u sastavu cementa glavni faktor koji pridonosi razvijanju topline hidratacije.

Bikalcijski silikat (belit i felit) $2CaO \cdot SiO_2$, često označen u literaturi i sa C_2S, sačinjava 20. . .35% težine klinkera, ali ne bi trebalo da ga je manje od 10% bilo u kojoj vrsti cementa, jer njegova je osobina da povećava čvrstoću cementa ili betona u kasnijim periodima vremena. On se spaja s vodom mnogo polaganije, te stvrdnjavanje traje godinama. Bikalcijski silikat razvija mnogo manje topline hidratacije nego trikalcijski silikat.

Trikalcijski aluminat, $3CaO \cdot Al_2O_3$, označavan i kraticom C_3A, element je koji utječe na brzo vezanje cementa. Ovu pojavu treba suzbijati, da beton ne bi vezao prebrzo, pa se klinkeru kod mljevenja dodaje sadrovac, koji usporava djelovanje C_3A.

Prisustvo veće količine trikalcijskog aluminata u cementu, koji se želi upotrijebiti za radove u moru nepovoljno je, jer on omogućuje stvara-

nje opasnog trikalcijskog sulfoaluminata. $3CaO \cdot Al_2O_3$ najviše pridonosi stvaranju topline hidratacije, te brzom stvrdnjavanju cementnog tijesta.

Tetrakalcijski aluminoferit (celit) $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ i trikalcijski aluminat sadržani su sa 20...25% težine klinkera. Označuje ih se još i kraticama C_4AF i C_3A. Kako je već rečeno, za vrijeme taljenja sirovine u rotirnoj peći prvo se vežu Al_2O_3 i Fe_2O_3 s vapnom i tu se najprije stvara tetrakalcijski aluminoferit, a preostali Al_2O_3 spaja se dalje sa 3 molekule vapna i stvara se trikalcijski aluminat. $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ ne pridonosi tako reći ništa čvrstoći, a stupanj razvijanja topline kod hidratacije ima približno isti kao i bikalcijski silikat, dakle malen.

Važan utjecaj na prirodu nastalih spojeva ima i način hlađenja klinkera. Ako klinker još sadrži živog vapna, njegovim se uskladištenjem to vapno polagano gasi.

Brzo kaljenje toplog klinkera pogoduje stvaranju staklaste mase koja nastaje u klinkeru. Cement s velikim procentom staklaste mase razvija veće količine topline.

Mljevenjem klinkera pretvara se on u finalan produkt, tj. u portland-cement, a stepen finoće mliva jako utječe na svojstva cementa i na njegovu aktivnost.

Naši standardi za cement propisuju ovu finoću mliva cementa: na situ s otvorima oka od 0,09 mm treba da ostane najviše 15% težinskih procenata prosijana cementa.

Mljevene čestice ispod 7,5 mikrona vrše jak utjecaj na svojstva betona, na čvrstoću i plastičnost, dok veće čestice ne utječu mnogo na spomenute karakteristike.

Radi usporavanja vremena vezanja dodaje se klinkeru pri mljevenju sadrovac, jer bez njega bi beton prebrzo vezao i nastale bi poteškoće kod daljeg ugrađivanja.

Sadrovac, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, usporava vezanje samo onih cemenata koji imaju velik procent kristalnog trikalcijskog aluminata. Prema našem Standardu za cement sadržina SO_3 ovisi o finoći mliva i sastavu cementa.

Prema Lerchu, optimalni procent SO_3 za cemente s malim sadržajem trikalcijskog aluminata iznosi 1,5%, a za cemente s visokim sadržajem C_3A iznosi 3,5%. Optimalni procent SO_3 određuje se tako da nam beton što manje buja u vodi, odnosno da se što manje krči na zraku.

Uloga sadre kao usporivača tumači se njenim kemijskim djelovanjem na trikalcijski aluminat, koji pridonosi brzini vezanja portlanda. Kemijskim spajanjem nastaje kriptokristalni sulfoaluminat koji s vapnom stvara gel, a taj gel, koji obavija čestice minerala, otežava prolaz molekula i iona tim česticama i tako usporava reakcije vezanja. Dobiveni niskosulfatni aluminat $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$ nije opasan, naročito ne u prvo vrijeme vezanja. To je razlog zbog kojeg je propisima i standardima ograničena gornja visina dodatka sadre kao usporivača, tj. određena je količina sadre koja će se sva utrošiti u prvih 24 sata vezanja cementa, vežući se sa slobodnim vapnom, vodom i C_3A.

Ako i dođe u tom razdoblju djelomično do stvaranja opasnog trikalcijskog sulfoaluminata, tzv. Candlotove soli koja jako bubri, neće doći do razaranja betona, jer masa je u to vrijeme još vrlo mekana i nema još formiran volumen. Osim toga početak stvaranja Candlotove soli nastupa tek kada je isorpljen sav željezni oksid, koji neutralizira C_3A u formi C_4AF.

Ukoliko bi dodatak sadre bio veći, ili beton primao sulfate izvana, npr. u dodiru s morskom vodom, dolazi do tz. sulfatne korozije betona, budući da je trikalcijski sulfoaluminat vrlo ekspanzivan i razara već stvrdnuti beton. Na tu pojavu detaljnije ću se osvrnuti kasnije.

Specifična težina porland-cementa varira od 3 000 do 3 150 kp/m³. Naš Standard dopušta kao najnižu specifičnu težinu portland-cementa 3,0 p/cm³.

Proces očvršćavanja cementa. Ako neko vezivo veže i očvršćuje na zraku, a isto tako i pod vodom, nazivamo ga hidrauličnim. Kao najvažnije hidraulično vezivo danas se smatra portland-cement.

Osnovna osobina protland-cementa jest da pomiješan s vodom stvara cementno tijesto, koje s vremenom očvršćuje.

Kod miješanja cementa s vodom nastupaju fizikalni i kemijski procesi koji su vrlo složeni i kompliciranі.

Unatoč mnogobrojnim ispitivanjima u laboratorijama pomoću najmodernijih mikroskopa, rendgenskim spektroskopima itd., ti procesi nisu još potpuno razjašnjeni i još se uvijek sigurno ne zna što se zapravo zbiva za vrijeme vezanja i stvrdnjavanja.

Da bismo upoznali sve reakcije kroz koje prolazi mješavina cementa i vode treba da ispitamo razloge disperzije koloida, zakone rastvaranja i ponovne formacije soli i kristala, fizikalne i kemijske reakcije, te djelovanje i reagiranje iona.

Vidimo koliko su zamršena i isprepletena sva ta zbivanja, a mnoge prelazne nestabilne faze još više otežavaju upoznavanje svih procesa i zakona koji djeluju za vrijeme vezanja i stvrdnjavanja cementnog tijesta.

Prije razmatranja tog problema htio bih upozoriti da vezanje i stvrdnjavanje cementa, odnosno betona, nije isti pojam. Kako sa početkom vezanja počinje i proces stvrdnjavanja, ta se dva procesa često poistovećuju i zamjenjuju. Aluminozni cement npr. veže dosta sporo, ali stvrdnjavanje mu je vrlo brzo. Visokovrijedni cementi nisu i brzovežući, oni samo stvrdnjavaju brzo, tj. oni dobivaju brzo velike čvrstoće. Brzovežući cementi najčešće nisu naročito čvrsti.

Vezanje cementa počinje ubrzo nakon miješanja cementa s vodom i taj proces traje kratko vrijeme, svega nekoliko sati. Trajanje vezanja ovisi o sastavu samog cementa, odnosno o procentu pojedinih klinkernih minerala u njemu, te o finoći mljevenja cementa.

Stvrdnjavanje cementa, odnosno betona, dugotrajan je proces; traje godinama.

Odmah poslije miješanja cementa s vodom dolazi do kemijskih reakcija i procesa što dovodi do stvaranja nekih novih kemijskih spojeva, koji su u početku uglavnom u koloidnom stanju, a tek kasnije dolazi do stvrdnjavanja i kristalizacije. Osnovni spojevi koji sačinjavaju cement jesu kalcijeve soli slabih kiselina, koje se lako vežu s vodom, te tako dolazi do hidrolize ili razlaganja. Treba međutim pretpostaviti da prije hidrolize dolazi do hidratacije, tj. do vezanja pojedinih kemijskih spojeva s vodom, pri čemu se razvija toplina hidratacije. Pri stvaranju topline hidratacije značajnu ulogu igra također sastav cementa i finoća mljevenja. Trikalcijski aluminat i trikalcijski silikat najviše pridonose stvaranju te topline, dok bikalcijski

silikat i tetrakalcijski aluminoferit vrlo malo sudjeluju kod stvaranja topline hidratacije.

Kod betoniranja velikih masa, gdje je u nutarnjim dijelovima hlađenje sporije, povećanje temperature uslijed stvaranja topline hidratacije može se povisiti za 30 °C.

Toplina hidratacije igra važnu ulogu u procesu vezanja, ali o tome treba misliti i pri samom betoniranju. Kod velikih masa betona sredina presjeka ima znatno više temperature od perifernih, pa uslijed toga dolazi i do nejednolikog rastezanja betona u presjeku. Nejednoliko rastezanje izaziva stvaranje pukotina u betonu, a to je vrlo neugodno, naročito za hidrotehničke radove. U takvim slučajevima treba odabrati cement koji kod vezanja razvija male količine topline, a to su tzv. felitni cementi.

O kemijskim procesima koji nastupaju za vrijeme vezanja cementa govorit ću kasnije, nakon što upoznamo teorije koje objašnjavaju proces stvrdnjavanja cementnog tijesta, odnosno betona.

U historijskom razvoju i studijama o zbivanju u cementnom tijestu za vrijeme vezanja i stvrdnjavanja dano je mnoštvo teorija različitih autora o mehanizmu stvrdnjavanja, ali do danas su se održale samo dvije, koje iako suprotne, ipak su pokazale da se u pojedinostima najviše približuju stvarnosti.

Još 1882. god. postavio je Le Chatelier tzv. teoriju kristala kojom se stvrdnjavanje cementnog tijesta tumači stvaranjem i razvijanjem isprepletenih kristala. Tu svoju teoriju objavio je Le Chatelier pet godina kasnije, 1887. godine.

Radi boljeg razumijevanja teorije kristala treba da se prije upoznamo s nekim postavkama termodinamike.

Topljivost nekog nestabilnog sistema uvijek je veća od topljivosti stabilnog. To znači, ako je nestabilni sistem u stanju zasićenog rastvora, ista će zasićenost predstavljati u stabilnom sistemu prezasićen rastvor. Ako je neki rastvor prezasićen dolazi do taloženja i stvaranja kristala, i to tako dugo dok rastvor ne postane opet samo zasićen. Nestabilni anhidridi u prisustvu vode hidratiraju, čime se stvara nov stabilan sistem, jer su hidratizirane soli manje rastvorljive od anhidrida. Anhidridni cement u dodiru s vodom stvara dakle nestabilan sistem, dok hidrati formiraju stabilan sistem.

Kada dakle cement u dodiru s dovoljnom količinom vode stvara nestabilan sistem do pune zasićenosti on postaje za stabilan sistem prezasićen, pa dolazi do taloženja jednog dijela hidratnih kristala. Prezasićen stabilni sistem taloži hidratne mikrokristale koji se isprepliću i skupljaju, te stvaraju tzv. dvojne kristale. Tim odvajanjem, odnosno kristalizacijom jednog dijela hidratnih kristala, stabilni sistem postaje samo zasićen, a taj rastvor za nestabilni sistem predstavlja premalo zasićen rastvor.

Premalo zasićen rastvor opet počinje hidratirati nove količine anhidridnog cementa, i to tako dugo dok rastvor ponovo ne postigne punu zasićenost nestabilnog sistema, što pak ponovo izaziva taloženje u stabilnom sistemu. Taj proces nastavlja se tako dugo dok ima čestica anhidridnog cementa koje još nisu hidratirale, odnosno dok ima dovoljno vode za vezanje.

Kristali koji se tako sve više i više formiraju i isprepliću u neku mrežastu masu stvaraju stabilan skelet oko kojega se gomilaju novostvoreni kristali, a cementno tijesto sve se više zgušćuje i stvrdnjava.

Michaelis je svoju teoriju gela ili koloida objavio dvadesetak godina kasnije, a Kühl ju je prihvatio i upotpunio.

Anhidridne čestice cementa u dodiru s vodom formiraju gelatinoznu koloidnu masu, koja uslijed endozmoze nastoji obaviti ostale čestice i ispuniti prostore između njih.

Ovakav hidrogel prema Laplaceovu zakonu nastoji svoj volumen formirati tako da mu je oplošje minimalne površine.

Čestice nehidratiranog cementa omotane masom gela sišu vodu iz gela i tako se gel zgušćava, a jezgra hidratira do potpune hidratacije svih čestica do u srž, što traje godinama.

Kühl smatra da se gel formira od bikalcijskog silikata i trikalcijskog amorfnog aluminata, te od oslobođenog vapna uslijed hidratacije trikalcijskog silikata. Ta »faza gelova« za vrijeme stvrdnjavanja naročito je bogata i uočljiva kod fino mljevenih pucolanskih cemenata.

»Faza gelova« svakako je samo prolazna nestabilna faza, jer se gelovi sušenjem pretvaraju u tvrdu masu. Gelovi se, već prema svom kemijskom sastavu, u kasnijoj fazi pretvaraju u kristale koji zalijepljeni uz gel počinju formirati novo mikrotkivo, koje tek nakon dugog vremena prelazi u posve čvrsto tijelo.

Prema ovoj teoriji najprije nastaje faza gelova, koji u drugoj fazi prelaze u nestabilno kriptokristalno stanje, a tek na kraju u mikrokristalno stabilno stanje.

I jedna i druga teorija imaju još i danas svojih sljedbenika, ali izgleda da se i ovdje istina nalazi negdje u sredini.

Pronalaskom i usavršenjem elektronskog mikroskopa, kojim možemo vršiti povećanja i preko 30 000 puta, dovelo je do toga da mnoge kristale koji su se prije samo naslućivali sada možemo i vidjeti. Stvaranje gelova za vrijeme vezanja cementa također se ne može negirati, pa vidimo da stvaranje i postojanje kristala i gelova igra važnu i osnovnu ulogu za vrijeme vezanja i stvrdnjavanja cementnog tijesta, odnosno betona.

Unatoč tome, što mi danas pomoću elektronskog mikroskopa možemo pratiti stvaranje pojedinih kristala, te prema njihovoj veličini i obliku prepoznavati npr. igličaste kristale C_3S, sferične kristale u obliku kuglica slobodnog vapna, heksagonalne kristale C_3A itd. te njihove kasnije prekristalizacije do stabilne faze, ipak još uvijek nisu razjašnjeni svi momenti koji dovode do stvrdnjavanja cementnog tijesta, odnosno betona. Polagani gubitak vode, koja se jednim dijelom isušuje a drugim dijelom troši na kasniju hidrataciju većih zrna, također igra, iako indirektno, stanovitu ulogu kod stvrdnjavanja.

Iako ovdje govorim samo o portland-cementu, a ne o betonu, ne mogu a da se ne dotaknem i Freyssinetove termomehaničke teorije, jer nam i ona rasvjetljuje i zaokružuje sliku stvrdnjavanja, te ukazuje na stvaranje i djelovanje unutarnjih sila, koje također utječu na proces stvrdnjavanja.

Dokazano je da samo 15...20% količine vode potrebne za stvaranje cementnog tijesta hidratizira, a ostatak od 80...85% ostaje nevezan. U stvrdnutoj masi betona nalaze se dakle čvrste čestice, voda i zrak. Voda najvećim dijelom ostaje u betonu slobodna, te u prvo vrijeme ispunjava većinu pora i kapilara. Ostatak pora ispunjen je zrakom koji je ušao u beton za vrijeme miješanja. Količina zraka u betonu iznosi oko 1...3%. Slobodna voda s vre-

menom jednim dijelom ishlapljuje a drugi, manji dio, troši se na zakašnjelu hidrataciju. Freyssinet u svojoj termomehaničkoj teoriji tumači stezanje betona na zraku na ovaj način:

Prisustvo vode i zraka, što je stalna pojava svakog betona, izaziva stvaranje pora i kapilara u cementnom tijestu, odnosno betonu, pa svaki beton, bez obzira na to kako bio gust, više je ili manje porozan. Radi tih pojava Freyssinet ga naziva pseudokrutim, koje stanje ima drukčija svojstva nego neko homogeno tijelo.

Ako su pore velike i ispunjene vodom, ona u njima vremenom ispari. Šupljina pore ostaje ispunjena zrakom i parama vode.

U mikroporama i sitnim kapilarama ispunjenim vodom stvara se na površini vode menisk, koji uslijed vlačkih napetosti površine meniska pritišće na stijene kapilara. Što su dimenzije kapilara sitnije, to su pritisci meniska veći.

Kako se pore i kapilare nalaze u čitavoj masi betona i teku u svim smjerovima, izazvane sile površine meniskusa dolaze u ravnotežu, a kruti skelet betona dolazi pod unutarnji pritisak, koji izaziva skupljanje betona.

Pritisci koji djeluju na već oformljen skelet kristala ukrućuju ga, a kristali stvoreni kasnijom hidratacijom povećavaju procent krutog dijela na račun pora, koje se smanjuju. Beton zbog toga starenjem postaje čvršći i gušći.

Ako beton uronimo u vodu sve se pore i kapilare ispune vodom. Tada na stijene pora ne djeluje nikakav pritisak, pa nema ni stezanja betona, ukoliko ne postoji razlika temperature, tj. da vanjska temperatura nije niža od temperature betona.

Nakon ovog općenitog razmatranja procesa stvrdnjavanja pozabavimo se malo i s kemijskim procesima koji se zbivaju kod vezanja, što nam je potrebno da bismo mogli kasnije bolje shvatiti uzroke korozivnog djelovanja morske vode na portland-cement, odnosno beton. Za početak i svršetak vezanja cementa naši propisi predviđaju temperaturu cementa i vode $+20\ ^0C \mp 2\ ^0C$, a prema našim standardima početak vezanja ne smije nastupiti prije 1,30 sati. Početak vezanja najčešće nastaje pri kraju drugog sata, ali vrijeme vezanja ne smije trajati više od 3 sata. Svršetak vezanja prema JUS-u mora da se javi prije vremena od 10 sati.

Prema različitim vrstama cementa poznajemo sporo, normalno, brzo i lažno vezanje. U koju od gore spomenutih grupa svrstavamo pojedini cement odlučuje brzina početka vezanja. Cementi koji počinju vezati u minimalnom vremenu kako to određuju propisi zovu se normalni, a koji vežu ranije oni su brzovežući. Brzovežući cementi sadrže obično veći procent trikalcijskog silikata, a malo sadrovca, ili su slabije pečeni. Oni kod vezanja razvijaju veću toplinu, pa se upotrebljavaju za betoniranje na niskoj temperaturi.

Cementi koji sporo vežu sadrže mnogo više bikalcijskog silikata i kod vezanja razvijaju mnogo manje topline. U početku ovakvi felitni ili belitni cementi daju manje čvrstoće, ali njihova čvrstoća s godinama raste i na kraju dosežu čvrstoću alitnih cemenata. Spomenuto je i lažno vezanje cementa. Ta pojava nastupa kod nekih cemenata kada ih pomiješamo s vodom, pri čemu dolazi do abnormalno brzih reakcija hidratacije i skrućivanja.

Razlika između brzog i lažnog vezanja je u tome što kod brzog vezanja cementno tijesto, ili beton, veže i stvrdne definitivno, dok kod lažnog vezanja brzo stvrdne, ali se kod daljnjeg miješanja može uspostaviti skoro normalna konzistencija betona.

Još uvijek nisu poznati uzroci koji dovode do lažnog vezanja cementa, jer lažno je vezanje uslovljeno mnogim uzrocima, kao nehomogenim sastavom cementa, mljevenjem klinkera kod temperatura preko 110 °C, nepotpunim pečenjem, vjetrenjem cementa itd.

Mnogi danas smatraju da do lažnog vezanja dolazi dehidratacijom sadrovca i prelazom u nestabilne modifikacije kalcijeva sulfata. Ima i drugih tumačenja o uzrocima lažnog vezanja, jer kako sam već rekao, lažno vezanje ovisi i o sastavu i procentualnom međusobnom odnosu glavnih minerala klinkera. Sadrovac npr. neće djelovati kao usporivač vezanja ako cement sadrži nizak procent Al_2O_3.

Lažno vezanje nepovoljno se odražava na kvalitet betona jer traži veću količinu vode kod miješanja betona, smanjuje prionljivost cementnog morta za agregat i čelične uloške u armiranom betonu, smanjuje čvrstoću betona radi povećanog vodocementnog faktora, manje je otporan protiv smrzavanja itd.

Sva četiri glavna klinkerska minerala, C_3S, C_2S, C_3A i C_4AF, lako reaguraju s vodom, pri čemu dolazi do hidrolize. Hidroliza klinkerskih minerala prelazi u rastvor vapna bez rastvaranja drugog produkta hidrolize. Kako je količina vode za izradu morta ili betona relativno mala, hidroliza klinkerskih minerala nije potpuna i ne stvaraju se kiseline i baze od kojih su ti minerali klinkera obrazovani.

Ovo se tumači time što hidroliza teče postepeno, pa se stvaraju manje bazni spojevi i dolazi do cijepanja visokobaznih kalcijevih silikata i aluminata. Oslobođeni molekul CaO prelazi u $Ca(OH)_2$ čime dolazi u rastvoru do veće koncentracije vapna.

Ako je koncentracija hidrosilikata i hidroaluminata jednaka ili veća od koncentracije vapna ne dolazi do hidrolize, već odmah do hidratacije. Da može doći do hidrolize kalcijevih silikata kao minerala klinkera, koncentracija vapna u vodi ne smije biti veća od 0,09 g/l CaO, a za trikalcijski aluminat 0,16 g/l CaO. Ovakova je situacija moguća samo uz velike količine vode. Iz svega gore rečenog vidi se da kod stvrdnjavanja cementa u početnom stadiju dolazi do oslobađanja vapna.

Za prosječni najbolji sastav klinkera imamo ovu formulu

$$CaO = 2{,}80\ SiO_2 + 1{,}65\ Al_2O_3 + 0{,}70\ Fe_2O_3$$

U toj formuli nisu dane kemijske reakcije i ona ne predstavlja molekularne težine svojih tijela, već njihov ponderalni procent u smjesi.

Već s obzirom na količinu kojom je zastupan u cementnom klinkeru, trikalcijski silikat poslije miješanja cementa i vode brzo zasićuje vodu vapnom dobivenim hidrolizom, te koncentracija vapna postaje veća od graničnih za ostale minerale klinkera

$$3CaO \cdot SiO_2 + nH_2O \rightarrow 2CaO \cdot SiO \cdot mH_2O + Ca(OH)_2$$

U stvari ipak ima manje oslobođenog vapna od količine koju bi dala gornja reakcija i to iz dva razloga:

1) Izlučeno se vapno rastvara i karbonizira i tako se gubi za ostale reakcije.

2) Sva cementna zrna u početku se ne spajaju istovremeno s vodom. U prvih 28 dana spajaju se potpuno s vodom samo zrna do cca. 15 mikrona promjera. Veća zrna spajaju se potpuno s vodom kasnije, a zrna preko 30... 40 mikrona uopće ne hidratiziraju, ili tek nakon nekoliko godina, kada hidratiziraju s kapilarnom ili novonadošlom vodom.

Što se događa s većim zrnima od 45 mikrona danas se još tačno ne zna, ali izgleda da oni hidratiziraju samo površinski, a jezgra ostaje inertna i vlada se u betonu kao agregat.

Bikalcijski silikat spaja se s vodom mnogo sporije od trikalcijskog, pa on utječe tako da beton polako, godinama očvršćuje

$$2CaO \cdot SiO_2 + nH_2O \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O.$$

Trikalcijski aluminat, kako je već rečeno, pridonosi brzom vezanju i pri tome stvara toplinu vezanja koju nazivamo egzotermijom.

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O.$$

Cementi s većim sadržajem trikalcijskog aluminata nisu prikladni za radove u moru ili u sulfatnim vodama, jer dolazi do spajanja trikalcijskoc aluminata s kalcijskim sulfatom, pri čemu se stvara dvostruka sol, kalcijski sulfoaluminat zvan etringit. Ovu sol nazivaju različitim imenima: cementni bacil, Candlotova sol, Devalova sol itd., većinom prema onima koji su te kristale uočili i dalje ispitivali njihovo djelovanje.

Ova sol formira se u prašnjavoj formaciji kristala poput finih iglica, a vrlo je ekspanzivna zbog primanja velike količine molekularne vode, te njenog bujanja, uslijed čega dolazi do razaranja betona. Povećanje volumena tih soli iznosi više od 3 puta

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaSO_4 + nH_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot mH_2O$$

Prema nekim istraživanjima $m = 28, 31, 60$ molekula vode.

Tetrakalcijski aluminoferit najčešće se oblikuje u trikalcijski aluminat ili tetrakalcijski aluminat, odnosno ferit

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 4Ca(OH)_2 + nH_2O \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 12H_2O + 4CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot mH_2O$$

Ako uzmemo veću količinu vode nego što je treba za hidrataciju neće radi toga doći do potpune hidratacije, već će se taj proces odvijati kako je to ranije opisano, a višak neiskorištene vode ostat će u porama cementnog tijesta ili betona. Tumači se da betoni izrađeni s velikim vodocementnim faktorom postaju porozni, te radi toga propusni za vodu, manje čvrstoće itd. Ovdje je još potrebno napomenuti da oslobođeno vapno za vrijeme stvrdnjavanja sprečava koroziju čeličnih uložaka u armirano-betonskim konstrukcijama, o čemu će kasnije biti još govora.

Normalni uslovi za stvrdnjavanje cementnog tijesta jesu vlažna sredina i temperatura od $+20\ ^0C \pm 2\ ^0C$. Ako je temperatura niža stvrdnjavanje je polaganije, a ako je viša, brže. Kad temperatura padne ispod $0\ ^0C$ proces stvrdnjavanja se zaustavlja. Kolikogod vapno u procesu stvrdnjavanja igra važnu ulogu, mora se paziti i kontrolirati fabrikaciju cementa da ne dobijemo previsok sadržaj vapna, odnosno nevezano vapno u gotovom produktu. Nevezano vapno u većim količinama uzrokuje nestalnost volumena i ekspanziju cementnog tijesta, odnosno betona. Do ekspanzije dolazi uslijed hidratacije živog vapna i to samo onda ako ta reakcija nastupa nakon završetka vezanja.

Isto tako treba paziti da u klinkeru ne zaostane slobodno vapno, jer bi ono kasnije u cementu, odnosno u cementnom tijestu, djelovalo ekspanzivno i razaralo beton. Da se to spriječi klinker mora da odleži u otvorenim halama na promaji, gdje slobodno vapno prima iz zraka vlagu i CO_2 i prelazi u kalcijev karbonat, koji više nije opasan.

Ako se u cementu nalazi previše magnezija također može doći do naknadne ekspanzije i razaranja betona. Radi toga propisi ograničuju sadržaj magnezija u cementu. Prema našem standardu cement može sadržati najviše 5% MgO.

O svemu tome mora se voditi računa, jer od cementa se traži da se prekomjerno ne skuplja niti da prekomjerno buja u vodi, tj. da udovoljava stalnosti obujma.

Napominjem još da većina naših tvornica cementa pri proizvodnji PC—250 dodaju kod mljevenja uz klinker do 30% zgure. Detaljnije o tome vidi u poglavlju »Specijalne vrste cementa za radove u moru«, odnosno »Portland-cement s dodatkom zgure«. Upozoravam da se to odnosi na PC—250. Cementare Usje i Šar ne dodaju zguru ni za PC—250.

UPOTREBLJENA LITERATURA

R. F. Blanks—H. L. Kennedy: *The technology of the cement and concrete.*
A. J. Blank: *What Conditions Produce False — Setting Cements. Concrete.* Cem. Mill Sect. br. 2/1935.
F. Whitworth: *Further Observations on the False Setting of Cement.* Cem. and Cem. Manuf. 4/1931.
G. T. Wilsnack: *The Causes and Correction of False Setting in Portland Cements.* Ideal Cem. Co. Denver, august 1952.
L'Hermite: *La sience du béton.*
L'Hermite: *La mécanique physique des bétons.*
E. Freyssinet: *Une révolution dans les technique du béton.*
M. Duriez: *Traité de Matériaux de Construction.* Paris, 1950.
M. Duriez: *Quelques développements sur les ciments actuels et les agrégats, en vue de la réalisation de mortiers et de béton.* Travaux, 1959.
P. Lhopitallier, P. Stiglitz et R. Vidal: *La Fausse prise des ciments.* La Revue des Materiaux de Construction, juli, 1952.
V. V. Kind: *Korozija cemenata i betona u hidrotehničkim objektima.*
J. V. Stoljarov: *Uvod u teoriju armiranog betona.*
P. S. Filosofov: *Stroitelnye materialy.*
E. Mörsch: *Der Eisenbetonbau.* Bd. I.
A. Hummel: *Das Beton — ABC.*
R. Grün: *Der Beton.*
V. Juranović: *Beton i armirani beton.* Svezak I.
V. Juranović: *Za bolje poznavanje portlandskih cemenata.* Naše građevinarstvo 1949.
M. Ferjan: *Karakteristike jugoslavenskih cemenata na zaključku 1953. g.* Naše građevinarstvo br. 3, 1955.
Privremeni tehnički propisi za beton i armirani beton, 1947. g.
Uputstvo za primenu Privremenih tehničkih propisa za beton i armirani beton, 1947.

SPECIJALNE VRSTE CEMENATA ZA RADOVE U MORU

Aluminozni cement (boksitni, taljeni, Lafarge-cement) najčešće se naziva Lafarž, jer je prvi puta proizveden u Francuskoj, u laboratoriju Lafarge.

Kod nas se aluminozni cement proizvodi u tvornici cementa »Giulio Revelante« u Puli, godišnje oko 20 000 t, a pod imenom »Istrabrand«. Naš aluminozni cement vrlo je dobre kvalitete i u svemu može konkurirati stranim aluminoznim cementima.

Sirovina za izradu aluminoznog cementa jest boksit i vapnenac pomiješani u približnom omjeru 1:1, te topljeni do temperature od 1500—1600 °C. Dalji postupak s klinkerom isti je kao i kod portland-cementa.

Boksit se sastoji od gline pomiješane s više ili manje željeznog oksida, pa je radi primjesa hematita crvenkaste boje.

Budući da je Lafarž-cement oko dva do tri puta skuplji od portland-cementa, upotrebljava se samo tamo gdje je nenadoknadiv.

Aluminozni cement u okruglim procentima sadrži

gline Al_2O_3	40% (30...50%)
vapna CaO	40% (35...45%)
zemlje kremenjače SiO_2	10% (5...15%)
željeznog oksida Fe_2O_3	10% (5...15%)

Ostale manje važne primjese dolaze u vrlo malim procentima.

Aluminozni cement uglavnom je sastavljen od monokalcijskog aluminata $CaO \cdot Al_2O_3$, koji je i nosilac njegovih hidrauličnih osobina, što je osnovna karakteristika ovog cementa.

Glina daje aluminoznom cementu njegovu ljepljivost i jak otpor prema svim agresivnim vodama, osim bazičnim ili alkalijskim.

$$2(CaO \cdot Al_2O_3) + 10H_2O \rightarrow 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 7H_2O + 2Al(OH)_3$$

Kako vidimo, u ovoj reakciji hidratacije nastaje bikalcijski aluminat, koji kristalizira u heksagonskim nestabilnim kristalima, koji uslijed različitih faktora prelaze kasnije u stabilne kristale trikalcijskog aluminata u kubičnom sustavu.

Ranije se smatralo da ako je za vrijeme vezanja aluminoznog cementa temperatura sredine do 30 °C da će se stvarati heksagonski kristali, a ako je temperatura veća, da se stvaraju oktaedarski kristali.

Aluminatni cement veže dosta sporo, ali stvrdnjavanje mu je vrlo brzo, tako da već nakon 7 dana beton aluminoznog cementa doseže 80% svoje čvrstoće. Nakon 24 sata aluminozni beton postiže već takovu čvrstoću da se, ako je potrebno, može skinuti oplata. Pri većim temperaturama sredine od

30 °C danas se znade da dolazi do brže rekristalizacije heksagonalnog aluminata u kubni, i to što je temperatura viša i rekristalizacija je brža, ali i kod tih viših temperatura bikalcijski aluminat se najprije kristalizira heksagonski. Hidratacijom aluminoferita koji se nalazi u aluminoznom cementu stvara se željezni hidrat koji je tamne čokoladne boje, a tu boju u toj fazi poprima i beton. Spomenutom hidratacijom stvaraju se oktaedarski aluminati, koji dalje pridonose rekristalizaciji nestabilnih heksagonskih aluminata u kubne, što dovodi do razaranja i propadanja betona.

Kasniji gubitak čvrstoće aluminoznih cemenata i betona, koji katkada doseže i 50% ranije čvrstoće, uzrokovan je spomenutom rekristalizacijom, koja se razvija sama po sebi. Međutim uzroci ubrzanja rekristalizacije jesu prisustvo vode, koncentracija vapna i povišena temperatura.

Za aluminozne cemente može se reći da je njihova čvrstoća u obrnutom omjeru prema temperaturi okoline.

Aluminozni cementi pri hidrataciji razvijaju vrlo velike količine topline, pa se katkada zagriju i do 100 °C. Zbog toga je aluminozni cement nepodesan za betoniranja u velikim masama, jer radi nejednolikog hlađenja u presjeku dolazi do pukotina u betonu. Ako se ipak mora betonirati veće mase treba betonirati u slojevima od 30 do 50 cm visine, čekati dok temperatura izbetoniranog sloja ne padne ispod 20 °C, i tek tada ugrađivati gornji sloj. Radi razvijanja topline ovaj je beton prikladan za betoniranje zimi, pa i na temperaturi do — 20 °C, a da se betonu ne moraju dodavati nikakve primjese zbog zagrijavanja i sposobnosti vezanja. Ovom cementu potrebna je mnogo veća količina vode za vezanje, ali treba paziti da se pri tome ne dodaje previše vode, jer inače znatno gubi na čvrstoći.

Već smo govorili o koroziji betona portlanda u dodiru sa sulfatima te stvaranju Candlotove soli, uslijed čega beton bubri i ljušti se, pa razmotrimo sada djelovanje sulfata na aluminozni beton.

Kod Lafarž-cementa pri spajanju sa sulfatima imamo ovu reakciju

$$3(2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 7H_2O) + 6(Ca\,SO_4 \cdot 2\,H_2O) \rightarrow 2(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\,CaSO_4) + \\ + nH_2O + Al_2O_3 \cdot mH_2O$$

Ovako dobiveni sulfoaluminat ne hidratizira i ne dolazi do bubrenja.

Budući da aluminozni cementi vrlo rijetko sadrže trikalcijski aluminat oni su otporni u sulfatnim rastvorima pa ne dolazi do stvaranja Candlotove soli.

Aluminozni cement vrlo je otporan u morskoj vodi, ali unatoč tome ne smije se upotrebljavati morska voda za miješanje betona. Kod upotrebe aluminoznog cementa također treba izbjegavati glinaste agregate. Beton aluminoznog cementa veoma je otporan u morskoj vodi, no mora se paziti da se u njegovoj blizini ne izvode radovi s portland-cementom. Ranije smo napomenuli da je slobodno vapno opasno zbog rekristalizacije, a poznato nam je da portland-cement pri hidrataciji stvara slobodni CaO.

Kod izrade aluminoznog betona treba naročito paziti da svi strojevi, miješalice i alati budu potpuno očišćeni od portland-cementnog betona, jer miješanje portland- i aluminoznog cementa daje smjesu koja stvrdnjava za nekoliko minuta.

Radi opadanja čvrstoće aluminoznog betona nastale uslijed rekristalizacije, u Francuskoj je od 1943. g. zabranjena upotreba aluminoznog cementa čak i za podmorske radove.

Ukoliko se međutim vodi stroga kontrola da se ne betonira s aluminoznim cementom na temperaturi većoj od 30 °C, da beton ne bi dobivao slobodna vapna i da u agregatu ne bi bilo alkalija, može se dobiti dobar beton za podmorske radove, jer je on jedan od najotpornijih na agresivno djelovanje morske vode.

Napominjem još da se aluminozni cement ne smije ponovno miješati, a time u vezi ne smije se mort ili beton izrađen od aluminoznog cementa za vrijeme vezanja ni poravnavati ili gladiti zidarskom žlicom.

Metalurški cement prvi je put proizveden u Njemačkoj 1892. g. Danas se proizvodi i u ostalim državama Evrope i Amerike, a u Njemačkoj proizvodnja metalurškog cementa i cementa sa zgurom iznosi 40% čitave proizvodnje cementa.

Naši standardi za metalurški cement navode slijedeće: »Ovaj cement dobiva se finim mljevenjem mješavine granulirane zgure portland-cementnog klinkera i regulatora vezivanja. Dodatak zgure kod ovih cemenata iznosi više od 30% od težine mješavine.

Tipovi ovog cementa ostaju isti kao kod portland-cementa, samo se uz tip mora navesti i procenat dodatka zgure od težine mješavine. Skraćena oznaka je npr. PC 31 M 250, PC 50 M 350, PC 40 M 450.«

Naš standard za cement dao je jasnu definiciju metalurškog cementa. Portland-klinker, granulirana zgura i sadra zajedno se fino melju i tako dobivamo metalurški cement.

Prije razmatranja metalurškog cementa, njegovih svojstava i upotrebe raspravljat ćemo malo o granuliranoj zguri visokih peći. To je nemetalni proizvod koji se uglavnom sastoji od silikata i aluminijskog silikata kalcija. Zgura se stvara zajedno sa željezom u visokim pećima, te se onda kali naglim hlađenjem taljene mase u vodi ili na zraku.

Budući da je za upotrebljenu zguru kod izrade cementa vrlo važna njena što jača hidrauličnost, treba voditi računa o njenom kemijskom sastavu i fizikalnim svojstvima.

Zgura koja odgovara traženim svojstvima mora da zadovolji ovoj formuli

$$\frac{CaO + MgO + {}^1/_3Al_2O_3}{SiO_2 + {}^2/_3Al_2O_3} = 1$$

ili prema našem standardu

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1$$

Uza sve to najbolje je s izabranom zgurom vršiti ispitivanja u laboratoriju, te na osnovu rezultata odrediti njen kvalitet. Ako granuliranu zguru pomiješamo s vodom vidjet ćemo da je slabo hidraulična, odnosno da hidratira vrlo polagano. Ako je pomiješamo s portland-cementom, slobodno će vapno nastalo kod hidratacije biti aktivator za zguru i ona će vezati mnogo brže.

Tipična analiza granulirane zgure u %

CaO	47,0
CaO_2	33,0
Al_2O_3	15,5
Fe_2O_3	0.5
MgO	0,2
S	1,8

Prosječna specifična težina zgure iznosi 2,20...2,30 Mp/m³. Iskorištavanje zgure za fabrikaciju hidrauličnih veziva ima vrlo veliko ekonomsko značenje jer se na taj način korisno upotrebljava zgura, inače otpadak čeličana. O tome bi trebalo kod nas razmisliti, pa da naše tvornice cementa pridu intenzivnijoj proizvodnji metalurških i ostalih cemenata s dodatkom zgure, a naše građevinarstvo uputiti u njihovu upotrebu.

Već sam spomenuo da u Njemačkoj proizvodnja cementa s dodatkom zgure iznosi 40% čitave proizvodnje cementa. Iako oni imaju vrlo jaku industriju željeza, pa je i to jedan od uzroka snažne proizvodnje metalurških cemenata, mislim da postoji i drugi uzrok, naime ekonomičnost.

Za izradu metalurškog cementa može dodatak mljevene zgure iznositi 75 do 80%, a portland-cementa 25 do 20%. Zguru treba samo samljeti kao i cementni klinker, a svi izdaci za izradu cementnog klinkera, od kopanja sirovine, njenog drobljenja, topljenja u rotirnim pećima i spremanja te hlađenja klinkera 80 postotna su ušteda izradom ovih cemenata. Čini se da je upotrebom bazične zgure u industriji cementa zgura najekonomičnije korištena.

Da ne dođe do zabune napominjem da bazične zgure pomiješane s cementom daju otpornu mješavinu prema sulfatima, dok kisele zgure radi većeg sadržaja glinice nisu otporne u mješavini prema sulfatima, jer dolazi do stvaranja opasnog kalcijskog sulfoaluminata. Kisele metalurške zgure mogu se upotrijebiti kao pucolanski dodatak.

Za izradu lakih betona upotrebljava se zgura koja se dobiva sagorijevanjem tzv. kotlarske zgure. Ovdje bih usput htio spomenuti da mi u građevinarstvu često predlažemo, a i upotrebljavamo, zguru za izradu specijalnih betonskih izrađevina, opeka itd.

Mišljenja sam da pri tom ne postupamo pravilno i ekonomično, jer tada mam zgura nadomještava agregat, a taj isti materijal bismo mogli koristiti kao cement.

Kako za sada još nemamo veće količine uporabljivih zgura, treba ih maksimalno koristiti tamo gdje imamo od nje najveće ekonomske koristi. Ukupna proizvodnja zgure u našoj zemlji iznosila je 1961. oko 1 000 000 tona.

Zbog varijacija rudače kod proizvodnje željeza ne može se tačno reći kolika količina te zgure odgovara za dodavanje portland-cementu, ali i ovako možemo dobiti bar kakvu-takvu sliku o mogućnosti korištenja zgure u cementnoj industriji. Sve naše cementare troše godišnje oko 150 000 tona zgure, što smatram da je još uvijek vrlo malo, te da bi bilo rentabilno proizvoditi više metalurških cemenata, uz pravilnu popularizaciju tih otpornih i kvalitetnih cemenata za radove u moru.

Kod nas se zgura za cement za sada dobiva iz željezara u Sisku, Štorama, Jesenicama i Ilijašu. Zgura željezare iz Zenice još se ne koristi radi

raznovrsnosti sirovine, pa time u vezi i radi njene različite kvalitete. »JUCEM«, zajedno sa željezarom iz Zenice, vrši ispitivanja i analize o odvajanju bazičnih zgura od kiselih. Bazične zgure koristile bi se za proizvodnju cementa, a kisele kao agregat u proizvodnji betonskih polufabrikata.

Kod ispitivanja razlika bazičnih i kiselih zgura istražuje se težinski odnos kalcijskog i silicijskog oksida.

Kod bazičnih zgura taj odnos mora biti

$$i = \frac{CaO}{SiO_2} = 1{,}30\ldots1{,}50,$$

a kod kiselih manji od 1,10.

Kod upotrebe zgura za radove u moru treba još voditi računa o tome da u zguri nema sumpornih spojeva više od 2%, a ni magnezijevog oksida više od 2%,

Naši standardi propisuju za metalurške cemente kao minimalni dodatak zgure 30%, dok gornju granicu ne određuju. Prema stručnoj literaturi gornja granica iznosi oko 80%. Normalni dodatak kreće se obično od 60 do 70%.

Kod viših procenata zgure portland-cement vrši ulogu aktivizatora vezanja, pa što je veći procent portlanda vezanje je brže, a otpornost na agresiju sulfata manja. Veći procent zgure povećava otpornost, a produljuje trajanje stvrdnjavanja.

Ukoliko bi procenat zgure pao ispod 30%, takav cement treba tretirati kao pucolanski.

Kako je već rečeno, slobodno vapno nastalo hidratacijom portland-cementa djeluju na zguru kao katalizator koji pospješuje hidrataciju silikata i aluminata zgure.

Produkti očvršćenja ovih cemenata vjerojatno su monokalcijski hidrosilikat i bikalcijski hidroaluminat.

Ovi su cementi prema tome slični pucolanskim cementima s obzirom na koroziju, te kako nemaju slobodnog vapna ni jako baznih kalcijskih hidroaluminata otporni su na koroziju morske vode, pa se mnogo primjenjuju kod podmorskih gradnja. Za normalne mješavine početak vezanja ne smije da uslijedi prije 45 minuta, a kraj ne smije kasnije od 12 sati.

Za podmorske radove i masovni beton ovi cementi imaju neke važne prednosti pred portland-cementom.

U Sjedinjenim Državama Amerike metalurški cement melju vrlo fino, kako bi se čvrstoćom približili portland-cementu.

U prvo vrijeme, tj. za prvih 28 dana, čvrstoće su im otprilike jednake, a kasnije metalurški cement povećava čvrstoće na pritisak i savijanje nasuprot onima od čistog portlanda.

Metalurški cementi razvijaju obično nižu toplinu hidratacije od čistog portlanda, koja ovisi o izabranom portlandu i zguri koja se miješa. Budući da su ovi cementi vrlo fino mljeveni, beton načinjen od njih nepropustan je i vrlo obradiv.

Metalurški cementi osjetljiviji su na hladnoću od portland-cemenata, i zato treba obustaviti betoniranje s metalurškim cementom ako temperatura padne ispod 8 °C.

Metalurški cement za sada proizvodi jedino Cementarna Trbovlje, u svom pogonu Zidani Most. Godišnja proizvodnja kreće se oko 20 000 tona.

Portland-cement s dodatkom zgure. Prema našim standardima ovaj cement može imati dodatak zgure do 30%. Dobiva se finim mljevenjem mješavine granulirane zgure, portland-cementnog klinkera i regulatora vezanja.

Tipovi tog cementa ostaju isti kao oni portland-cementa, ali se uvijek uz tip mora navesti i procent dodane zgure u odnosu na težinu mješavine Skraćene su oznake npr. PC 25 Z 250, PC 23 Z 350, PC 24 Z 450.

Radi visokog sadržaja cementnog klinkera (80...70%), te niskog sadržaja zgure (20...30%), ovi se cementi ne razlikuju od klasičnih niti po svojim svojstvima niti po upotrebi. Mogu se upotrijebiti za radove u moru.

Naši standardi za sada ne spominju druge vrste cemenata miješanih sa zgurom osim ova dva koja smo dosada opisali. U inostranstvu ima još mnogo vrsti mješavina portland-cementa i zgure, koje pod različitim imenima, kao cement visokih peći, cement željeza itd. dolaze u prodaju. Svi su oni manje ili više otporni protiv agresivnog djelovanja morske vode.

Supersulfatni cement također je jedan od metalurških cemenata koji se upotrebljava za podmorske radove. Njega spominjem na kraju jer ga naši standardi ne navode, a osim toga više se ne proizvodi u Jugoslaviji.

1955. god. počela je proizvodnja supersulfatnog cementa u Staroj Gradiški, s kapacitetom od cca 10 000 t godišnje. Tvornica je 1957. g. prestala s radom, a postrojenja su prenijeta u Zenicu, gdje je nastavljeno s produkcijom. Koncem 1961. g. obustavlja proizvodnju i Zenica, što je svakako za jugoslavensko građevinarstvo, naročito pomorsko, osjetan gubitak.

Kako sam uvjeren da će se kod nas ponovno početi s proizvodnjom supersulfatnog cementa, pozabavit ću se s njegovom proizvodnjom i primjenom.

Supersulfatni cement proizvodi se od 1935. g. kada ga je Blondiau počeo izrađivati po usavršenom patentu Kühla (1907. g.). U inostranstvu se taj cement naziva još Sealithor.

Supersulfatni cement sporo veže, ali brzo stvrdnjava, ima veliku mehaničku čvrstoću i kemijski je otporan s malom hidratacionom toplinom od 25 cal/g. Kvaliteta supersulfatnog cementa ovisi o kvaliteti upotrebljene zgure i sadre što se dodaje smjesi s klinkerom, te o finoći mliva.

O hidrauličnosti supersulfatnog cementa uglavnom odlučuju gel monakalcijskog hidrosilikata, kalcijski sulfoaluminat i aluminijski hidroksid.

Da se oslobodi latentna energija zgure dodaje se kao katalizator katkada gašeno vapno, ili danas klinker portland-cementa. Prema ispitivanjima prof. Sokolovića opaženo je da u našim uslovima produkcije neki minerali klinkera štetno djeluju na kvalitetu i čvrstoću supersulfatnog cementa. Nakon njihova eliminiranja povećala se čvrstoća cementa za 30...40%, a tlačnu čvrstoću postigao je cement nakon 28 dana sa preko 680 kp/cm².

Sastav supersulfatnog cementa je oko 80% zgure visokih peći, 15% sadre i 5% klinkera portland-cementa.

Pri upotrebi ovog cementa ne dodavati previše vode kod miješanja betona da ne dođe do segregacije, i ne betonirati ako je temperatura okoliša pala ispod 12 °C.

To je najotporniji cement u morskoj vodi, ali nije dovoljno otporan u čistoj ili kiseloj vodi radi stvaranja Candlotove soli.

Supersulfatni cement ne smije se miješati s portland-cementom, jer djelovanje sulfata koje on sadrži može tako jako utjecati na portland-cement da on ne stvrdnjava. Ako je pak supersulfatni cement već stvrdnuo dodir s drugim betonima, npr. portlandom, nije više opasan, jer su sulfati supersulfatnog cementa već kristalizirali kao kalcijski sulfoaluminat u netopljivom obliku.

Beton cementa s dodatkom zgure spojiv je sa supersulfatnim cementom kao i s portlandom. Željezo ne korodira u betonu od supersulfatnog cementa.

Kod podmorskih radova supersulfatni cement može se miješati s morskom vodom.

Nedostatak toga cementa je taj što se ne preporučuje da bude uskladišten duže od tri mjeseca, jer se inače počinje zgrudavati i hidratizirati.

UPOTREBLJENA LITERATURA

I. V. Kravčenko: *Glinozemistyi cement.*
V. V. Kind: *Korozija cemenata i betona u hidrotehničkim objektima.*
M. Duriez: *Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments.* Travaux, br. 3—7, 1953.
M. Duriez: *Quelques développements sur les ciments actuels et les agrégats, en vue de la réalisation de mortiers et de bétons.* Travaux, 1959.
M. Duriez: *Traité de Matériaux de Construction,* I, 1950.
R. F. Blanks—H. L. Kennedy: *The technology of the cement and concrete.*
E. Mörsch: *Der Eisenbetonbau.*
E. Probst: *Handbuch der Betonsteinindustrie.*
V. Juranović: *Beton i armirani beton.* Svezak I.
P. Brzaković: *Problemi rekristalizacije aluminatnog Lafarge-cementa.* Naše građevinarstvo, br. 9 i 10, 1955.
A. Sokolović: *Metalurgijski supersulfatni cementi iz privrede.* Građevinar br. 4, 1955.

PUCOLANI

Pucolani se sastoje od aktivnog silicijevog ili aluminijevog oksida ili od njihove kombinacije, ali koji sami nemaju vezivih svojstava. Pomiješani s vodom i vapnom spajaju se u hidraulične spojeve i tako dobivamo hidraulično vezivo. Pucolan, iako je sam po sebi aktivan, ne može biti hidrauličan bez dodatka vapna. Pravi pucolani uvijek oskudijevaju na vapnu i zato sami po sebi ne mogu biti hidraulični.

Ima pucolana koje kao minerale nalazimo u prirodi. To su npr. fini vulkanski pepeo, tras, dijatomejska i infuzorijska zemlja, bentonitne gline i škriljci, opalska breča itd. Nadalje poznajemo prirodne minerale koji tek umjetnim oplemenjivanjem dobivaju pucolanska svojstva. To su npr. gline, ilovače i škriljevci. Glinu i škriljevce treba žariti na temperaturi od oko 700 °C, a ilovaču do temperature od oko 500 °C, da poprime potrebnu pucolansku aktivnost. Ako se žari do 1200 °C, te aktivnosti potpuno nestaje. Neke opalne materijale treba također žariti, a ima ih koji i bez prethodnog žarenja posjeduju pucolanska svojstva. Svi pucolani ne povećavaju svoju aktivnost žarenjem. Opaženo je dapače da neki italijanski pucolani gube na aktivnosti ako ih se prethodno žari. Imade i umjetnih pucolana, koje uglavnom dobivamo kao industrijske nusprodukte ili otpatke, npr. lebdeći pepeo koji nastaje u termičkim energanama s pogonom na ugljeni prah, koji sagorijeva na temperaturi od 1200 °C. Kao umjetni pucolan upotrebljavala se je već odavno, a i danas je u upotrebi, mljevena opeka.

Od naših pucolana spominjem opalsku breču s područja Beljakovca kod Kumanova u Makedoniji. Ova opalska breča aktivna je a da se ne žari i dodaje se portland-cementu u sirovu stanju, pa je razmjerno jeftina.

Njena kemijska analiza izgleda ovako:

SiO_2	83,97%
AlO_3	0,52%
Fe_2O_3	7,29%
MnO	0,18%
CaO	0,08%
Na_2O	0,12%
K_2O	0,54%
H_2O^+	5,05%
H_2O-	2,02%

Sve vrste prirodnih pucolana, kao i onih koji se još naknadno žare, ili umjetnih, treba mljeti do visokog stupnja finoće, da postanu aktivniji i sposobni za upotrebu u betonu.

Pucolani se obično melju zajedno s klinkerom na istu finoću kao i cement.

Vrlo je malo prirodnih pucolana koji su tako sitnozrnati da im mljevenje nije potrebno.

Koji procesi nastaju i kako pucolani djeluju na nove osobine betona do danas još nije potpuno poznato. Svakako su to i kemijski i fizikalni procesi. Kada bismo sve te procese poznavali, mogli bismo tačno odrediti optimalnu recepturu za određene pucolane i portland-cemente da dobijemo beton traženih kvaliteta.

Kada želimo dobiti optimalnu recepturu pucolanskog cementa, pravimo još i danas seriju pokusa različita međusobnog odnosa i tako pronalazimo optimalni omjer mješavine pucolanskog portland-cementa. Poznavanje samo kemijskog sastava pucolana pokazalo se nedovoljnim za upoznavanje njegove kvalitete i određivanja uzroka zbog kojih neki reagiraju pogodno, a neki ne. Ni petrografsko poznavanje pucolana nije dovoljno i sigurno da na osnovu njega odredimo aktivnost pucolana. Radi toga se počelo istraživati pucolane mikroskopskim i spektrografskim metodama, metodama difrakcije x-zraka i termičko-diferencijalnom analizom. Rezultati ovih ispitivanja u vezi s rezultatima kemijskih i fizikalnih ispitivanja sve više ulaze u bit tih nepoznatih problema prirode pucolanske aktivnosti, pa će jednog dana i ti problemi biti poznati, a nama omogućena lakša izrada betonâ kakove želimo i kakove trebamo.

Ako portland-cementu dodamo kvalitetan pucolan u optimalnoj proporciji poboljšat ćemo mnoge kvalitete betona, naročito za podmorske konstrukcije:

1) Poboljšava se obradivost betona.
2) Beton postaje otporniji protiv agresivnom napadanju morske vode.
3) Povećava se nepropusnost betona.
4) Za vrijeme stvrdnjavanja betona stvara se manje topline hidratacije.
5) Smanjuje se eventualna reakcija alkalije-agregat, a time i ekspanzija betona.
6) Povećava se vlačna otpornost betona.
7) Najčešće su proizvodni troškovi izrade betona niži.

Ukoliko se upotrijebi slabiji pucolan ili se loše proporcionira, dobiveni beton može imati slijedeće nedostatke nasuprot betonu od čistog portland-cementa:

1) Manju otpornost prema smrzavanju i otkravljivanju betona.
2) Potrebno duže vrijeme početnog stvrdnjavanja betona.
3) Povećanje stezanja betona.
4) Potrebu za većom količinom vode kod miješanja betona, a time u vezi i manja čvrstoća betona.

Pucolani su bogati kiselim koloidnim elementima, koji su sposobni da s oslobođenim vapnom daju hidrauličke spojeve, ili da dopuštaju hidrataciju i taloženje hidratnih gelova.

Danas se pretpostavlja, da spajanje pucolana s vapnom nije jedini uzrok dobivanju hidrauličkih svojstava, već da stanovitu ulogu u tom procesu igra i bubrenje uslijed taloženja koloidnih gelova zemlje kremenjače i čiste gline.

Ovdje se također može aplicirati kristaloidna i koloidna teorija, samo još nije jasno nastupaju li jednovremeno ili sukcesivno. Jasno je da je potrebna voda za ove reakcije. Neki koloidni gelovi polagano se kristaliziraju, a neki hidraulični kristali talože se i pospješuju gelove za vrijeme dekalcifikacije.

Do taloženja gelova dolazi kod recipročnog djelovanja koloida suprotnih oznaka, npr. zemlje kremenjače i gline, koji se talože u obliku pahuljica. Difrakcijom x-zraka identificirale su se mnoge kristalne supstancije. Elektronskim mikroskopom ustanovljeni su oblici kostura, koji nastaje daljnjim stvaranjem i spajanjem kristala. Takav proces traje duže vremena, dok konačno ne dođe do potpunog očvršćenja betona.

Razmotrimo sada kemijske procese vezanja hidratiziranog vapna portland-cementa s pucolanom, te kako se taj proces vezanja razvija vremenom.

Apsorpcija slobodnog vapna nakon hidratacije po pucolanu prije svega je funkcija stupnja zasićenja vodene okoline vapnom, ali isto tako i funkcija količina alkalija klinkera i pucolana, jer vapno je manje topljivo u alkalnim otopinama nego u čistoj vodi. Aktivni silicijev dioksid pucolana postepeno se veže sa slobodnim vapnom, koje nastaje kako smo vidjeli u poglavlju »Vezanja portland-cementa« hidrolizom trikalcijeva silikata i tako nastaje monokalcijev hidrosilikat

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \rightarrow CaO \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$$

Na normalnoj temperaturi od 20 °C vapno je topljivo u vodi kod zasićenosti od 1,3 g CaO na 1 litar vode, a za monokalcijev hidrosilikat 0,05.. 0,13 g CaO na 1 litar vode. Iz ovog je vidljivo da je monokalcijev hidrosilikat u vodi stabilniji spoj od slobodnog vapna.

Smatra se da su vezanja anhidrida trikalcijevog i bikalcijevog silikata u cementu ova

$$3CaO \cdot SiO_2 + 4{,}5\,H_2O \rightarrow CaO \cdot SiO_2 \cdot 2{,}5\,H_2O + Ca(OH)_2$$
$$2CaO \cdot SiO_2 + 3{,}5\,H_2O \rightarrow CaO \cdot SiO_2 \cdot 2{,}5\,H_2O + Ca(OH)_2$$

Ove jednadžbe prikazuju granične reakcije, ali u stvari čitav se proces ne odvija tako, jer oslobođeno vapno zasićuje okolnu tekuću fazu sve više, dok ne dosegne graničnu vrijednost. Radi toga se daljnje stvaranje vapna usporava ili potpuno zaustavlja. Sadržaj vapna u otopini umanjuje se međutim različitim fizikalnim i kemijskim reakcijama, npr. uslijed difuzije vapna prema van i njegove karbonizacije s otopljenim CO_2 u vodi, te stvaranjem kristala kalcita koji kalciniraju površinu betona. Nadalje dolazi do osiromašenja na vapnu uslijed apsorpcije vapna od aluminata cementa, što je proučio M. Lafuma.

Na običnoj temperaturi aluminati kalcijeva anhidrida hidratiraju i stvara se tetrakalcijev aluminat, ako je više od 1,08 g CaO na 1 litar. Ako je više od 0,56 g CaO/l stvara se trikalcijev aluminat hidriran sa 12 molekula vode, a ako je manje od 0,16 g CaO/l dobiva se bikalcijev aluminat hidratičan sa 7 molekula vode.

$$2CaO \cdot Al_2O_3 + 10H_2O \rightarrow 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 7H_2O + 2Al(OH)_3$$

Prema tome ovisno o sadržaju CaO u vodi aluminati cementa, odnosno pucolana, upijat će ili obnavljati vapno.

Kada rastvor vapna dosegne količinu od 0,05 g CaO/l ustaljuje se hidroliza silikata.

Općenito je poznato da je djelovanje pucolana u početku polagano zbog jake zasićenosti vapnom. Ali ono se može pospješiti i ubrzati. To se postiže kad je pucolan vrlo fino mljeven pa dolazi brže do vezanja vapna, jer pucolansko je djelovanje površinsko. Ako pucolan nije fino samljeven, do ravnoteže dolazi nakon duga vremena.

Iz svega je ovoga vidljivo da je vrlo teško odrediti tačnu količinu slobodna vapna u pojedinom vremenskom razmaku za vrijeme vezanja. Tu leži glavna teškoća određivanja potrebne količine nekog pucolana, koga bi trebalo dodati određenom cementu da se dobije optimalna mješavina. Moramo znati ukupnu količinu vapna koju pucolan treba da veže, ali isto je tako važno poznavati i brzinu vezanja pucolana, koji u pojedinom momentu stvrdnjavanja mora da veže hidratizirano vapno.

Sigurno je da ćemo pri izboru pucolana birati one koji su vrlo reaktivni i fino mljeveni. Ako računamo s većom količinom slobodna vapna, pa odredimo veću količinu pucolana za smjesu, dobit ćemo beton s većom kemijskom otpornosti, ali manjih čvrstoća i polaganijeg početnog vezanja.

U Americi su izvršena ispitivanja čvrstoće betona s različitim smjesama cementa i pucolana. Navodim rezultate, koji su prosjek od 10 do 20 ispitivanja:

Čvrstoća na vlak portland i portland-pucolanskog cementa u standardnom mortu

Tablica 3

Cement i dodatak pucolana u apsolutnom volumenu	Čvrstoća na vlak u kp/cm²			
	starost			
	7 dana	28 dana	1 god.	5 god.
100% cement tipa II	26,6	35,0	35,0	32,6
15% pucolana	25,2	33,6	42,7	37,8
25% pucolana	22,4	32,2	40,6	37,8
30% pucolana	21,0	34,3	43,4	42,7
35% pucolana	21,7	30,8	40,6	36,4

Čvrstoća na pritisak portland i portland-pucolanskog cementa u standardnom mortu

Tablica 4

Cement i dodatak pucolana u apsolutnom volumenu	Čvrstoća na pritisak u kp/cm²			
	starost			
	7 dana	28 dana	1 god.	5 god.
100% cement tipa II	246	347	398	441
15% pucolana	220	325	360	401
25% pucolana	204	298	355	368
30% pucolana	160	286	344	390
35% pucolana	165	264	316	353

Iz gornjih se rezultata vidi da pucolani u kasnijem razdoblju povećavaju čvrstoće na vlak, a smanjuju na pritisak. Smanjenja na pritisak nisu znatna i dobiveni rezultati zadovoljavaju.

Kad bismo prirodni pucolan upotrijebili a da nije fino mljeven, uz pretpostavku da ga dodajemo cementu u većem procentu, učinili bismo veliku grešku. Iako bi kemijska otpornost možda bila i povećana, povećala bi se i količina inertne materije, a s time u vezi smanjila bi se čvrstoća betona i njegova trajnost.

Već je spomenuto da treba tražiti što reaktivnije pucolane, što veće finoće mliva. U svijetu se već dosta upotrebljavaju različiti patentirani preparati koji još više aktiviraju djelovanje pucolana, naročito pospješuju njegova prvotna usporena vezanja, ali i povećavaju otpornost.

Dugim laboratorijskim ispitivanjima došlo se do spoznaje da čvrstoća pucolanskih betona raste i pada kao i njegova kemijska otpornost. Budući da su takova ispitivanja betonskih uzoraka mnogo brža od direktnog ispitivanja otpornosti na agresiju, što traje godinama, uvriježio se taj način ispitivanja. Za orijentaciju navodim da ispitivanjem čvrstoće na pritisak na cilindrima od morta 1:2:9 (vapno : pucolan : standardni pijesak) za aktivni pucolan dobivamo čvrstoću preko 70 kp/cm², a za slabije do srednje pucolane dobivamo čvrstoće od 0 do 56 kp/cm².

I naš JUS B. C 1. 018/59 izražava kvalitetu pucolana najmanjom tlačnom čvrstoćom.

Tablica 5

Oznaka kvalitete	Čvrstoća na savijanje	Tlačna čvrstoća kp/cm²
50	20	50
100	30	100
150	40	150

Osim ovoga, postoje i drugi načini ispitivanja otpornosti, npr. potapanje uzoraka u jači koncentrat kiselina, gdje je korozija mnogo brža, pa se tako i brže dolazi do rezultata.

Svaki od tih načina ima i svojih manjkavosti, pa o njima neću opširnije govoriti; već sam ih samo spomenuo.

Na osnovi mnogobrojnih ispitivanja i proučavanja uvidjelo se da je najoptimalniji dodatak pucolana oko 20...35% težine cijelog proizvoda.

Prema današnjem znanju količina od 50% bilo kojeg pucolana s portland-cementom previsok je dodatak, a ako je taj dodatak ispod 15%, onda se takva smjesa i dalje naziva portland-cementom, bez obzira na dodatak pucolana.

Kod aktivnih pucolana vezanje će početi prije 50 sati, a svršetak vezanja treba da nastupi prije 100 sati. Već je rečeno da mješavina pucolana i portland-cementa traži veću količinu vode za spravljanje morta ili betona, ali ta povećana količina ne bi smjela biti veća od 25% one koja je potrebna za mješavinu od portland-cementa. Specifična težina pucolana varira između 2,30...2,80 p/cm³, a zapreminska 1,0...1,1 p/cm³.

Pucolanski cement obično se proizvodi u tvornici, iako postoje slučajevi da se miješa s portlandom i na gradilištu. I uz istu cijenu po kilogramu, pucolanski cement dat će više veziva materijala od iste količine čistog cementa, radi niže specifične težine. Normalno to povećanje iznosi oko 7% apsolutnog volumena. U zaključku ovog poglavlja još bih jednom htio napomenuti kako se vrijednost pucolana ne sastoji samo u tome da veže sve vapno mješavine oslobođeno hidrolizom, već mora da ima i tu sposobnost da ga apsorbira tako brzo kako se ono stvara. Prema tim svojstvima pucolana ocjenjuje se njegova vrijednost kod upotrebe za beton u morskoj vodi.

Nekim ispitivanjima, pa i kod nas u Institutu za ispitivanje materijala SR Srbije, pokazalo se da je beton spremljen od portland-cementa i fine frakcije pijeska vapnenca, a krupnijih frakcija kremena pijeska, pokazao dva puta veću otpornost protiv korozije morske vode brzim postupkom nego beton izrađen s pucolanskim cementom i kremenim agregatom. (O tim pokusima govorim i u poglavlju »Različite vrste agregata za beton«).

Iz toga prividno proizlazi da smo riješili pitanje izrade otpornog betona za radove u moru bez upotrebe pucolana, tj. da možemo izrađivati otporan beton s portland-cementom i agregatom vapnencem. Mislim da ipak nije tako. Upotreba pucolana u pomorskim radovima, osim što nam daje otporan beton, povoljno utječe i na mnoge druge osobine i reakcije do kojih može doći u betonu, a koje su također odsudne za trajnost betona.

U daljnjim poglavljima, gdje govorim o alkalno-agregatnoj reakciji betona, vidi se također korisnost upotrebe pucolana. U slučaju da iz ekonomskih razloga moramo upotrijebiti ma i djelomično takav agregat koji izaziva alkalnu reakciju, morat ćemo razmišljati kako da tu pojavu otklonimo, a vidjet ćemo da i tu vrlo povoljno djeluje prisustvo pucolana.

Pri izboru cementa i agregata za beton koji će biti otporan i trajan u moru treba voditi računa o svim tim mnogobrojnim i komplicirano povezanim pojavama, ako hoćemo da izabrani beton bude zaista trajan. O svim tim pojavama pokušao sam govoriti u ovoj knjizi i dati im stanovita objašnjenja, onako, kako danas gledaju tehnika i nauka na njih. Iz svega zajedno dolazi se do zaključka da su pucolani ipak oni koji za izradu trajnog i otpornog betona u podmorskim radovima daju najpotpunije rezultate.

Lebdeći pepeo dobiva se kao otpadak električnim isprašivanjem dima u termoelektranama kod sagorijevanja ugljena samljevena u prah, na temperaturi sagorijevanja od 1100...1400 °C. Fino mljeveni lebdeći pepeo u svojstvu pucolana kao dodatak cementu primijenjen je prvi puta u Sjedinjenim Državama Amerike, a odanle je ta metoda brzo prešla u Evropu, gdje su Francuzi počeli s tvorničkom proizvodnjom.

Do pronalaska upotrebe lebdećeg pepela kao pucolana on se bacao kao talog i otpadak fabrikacije; iako skupocjen, nije predstavljao nikakvu vrijednost u ekonomiji. Zapravo je fino mljevenje ono što uzrokuje aktivno pucolansko djelovanje lebdećeg pepela. Taj pepeo bogat je aktivnom zemljom kremenjačom, a sadrži i dosta gline i željezna oksida. Sadržaj vapna obično je malen kao i kod ostalih pucolana.

Nesagorjela ugljena u lebdećem pepelu ne bi smjelo biti više od 12%.

Prosječni kemijski sastav lebdećeg pepela izgleda ovako:

Tablica 5a

Sastav	%	Sastav	%
SiO_2	50	SO_3	1
Al_2O_3	30	K_2O i Na_2O	5
Fe_2O_3	6	TiO_2	1
CaO	2	gubitak na vatri	3
MgO	2		

Prema ovome svaki pepeo nije uporabljiv kao pucolan, pa je nužno ispitati njegov kemijski sastav i fino ga samljeti. Ispravan lebdeći pepeo pucolan je koji daje najveće čvrstoće.

Dajem rezultate američkih pokusa u mješavini *portland-cement : lebdeći pepeo* = 70 : 30 na cilindrima 15 cm · 30 cm, s različitim vodocementnim faktorom.

Razvijanje čvrstoća uz dodatak od 30% lebdećeg pepela po težini

Tablica 6

Cement i lebdeći pepeo	V/C po težini	Čvrstoća na pritisak u kp/cm²			
		starost			
		20 dana	90 dana	180 dana	1 god.
100% cem. tipa II	0,43	480	552	571	597
30% lebd. pepela	0,43	330	487	515	565
100% cem. tipa II	0,48	374	443	430	496
30% lebd. pepela		283	447	473	482
100% cem. tipa II	0,53	283	355	361	377
30% lebd. pepela		235	374	419	463
100% cem. tipa II	0,58	299	348	384	386
30% lebd. pepela		200	351	378	419
100% cem. tipa II	0,63	297	365	387	413
30% lebd. pepela		167	310	335	389

Kod nas se također prišlo korištenju lebdećeg pepela u pucolanske svrhe i time dobilo nov materijal u građevinarstvu. Termoelektrane »Trbovlje«, »Kolubara« i »Kakanj« već odvajaju lebdeći pepeo kao pucolan, a vjerujem da će se, ukoliko već nisu, i ostale odlučiti da uz vrlo rentabilne uslove dadu našem građevinarstvu taj traženi materijal.

Rezultati ispitivanja koja su vršena u Institutu za ispitivanje materijala SR Srbije s lebdećim pepelom iz Kaknja i Kolubare, te ista ispitivanja u Zavodu za raziskavo materijala in konstrukcij SR Slovenije za lebdeći pepeo termoelektrane iz Trbovlja, dali su zadovoljavajuće rezultate.

Specifična težina sirova lebdećeg pepela kreće se od 1,85...2,05 p/cm³, a drobljen i rastaljen može doseći i težinu od 2,60 p/cm³.

Optimalnu količinu vode koja se dodaje smjesi cementa i lebdećeg pepela treba pokusima odrediti za svaki pojedini slučaj, a kreće se od 0,45 do 0,55. Veći postotak vodocementnog faktora može toliko smanjiti čvrstoću i korozivnu otpornost betona da dodavanje pepela cementu postaje beskorisno, pa i štetno.

UPOTREBLJENA LITERATURA

R. F. Blanks—H. L. Kennedy: *The technology of thecement and concrete.*

R. F. Blanks: *The use of portland-puzzolan cement by the Bureau of Reclamation.*

W. Kronsbein: *Flugaschen als hydraulische Zuschläge für die Herstellung von Bindemitteln für Mörtel und Beton.*

E. Probst: *Handbuch der Betonsteinindustrie.*

M. Duriez: *Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments.* Travaux, br. 3—7, 1953.

M. Duriez: *Quelques développements sur les ciments actuels et les agrégats, en vue de la réalisation de mortiers et de bétons.* Travaux, 1959.

V. V. Kind: *Korozija cemenata i betona u hidrotehničkim objektima.*

I. Karpinski: *Povećanje trajnosti betona pomorskih i hidrotehničkih postrojenja na osnovi najnovijih istraživanja.* Dokumentacija za građevinarstvo i arhitekturu br. 35 i 36, 1962.

I. Karpinski i P. Brzaković: *Pucolanska aktivnost.* Dokumentacija za građevinarstvo i arhitekturu br. 20, 1960.

P. Brzaković: *Ispitivanje primene letećeg pepela termoelektrane »Trbovlje«.* Dokumentacija za građevinarstvo i arhitekturu br. 19, 1960.

O KVALITETI VODE ZA MIJEŠANJE BETONA

Količina vode koja se dodaje pri izradi betona uvijek je mnogo veća od količine koja je potrebna za hidrataciju cementa.

Za samu hidrataciju potrebno je:

kod miješanja portland-cementa oko 20% težine cementa

kod pucolanskih cemenata oko 25% težine veznog sredstva

kod aluminoznih cemenata oko 40% težine cementa

kod alitnih portland-cemenata oko 40% težine cementa.

Voda za izradu betona mora biti čista, bez štetnih primjesa, dakle najbolja je pitka voda.

Štetne primjese jesu šećer, biljne i životinjske masti, ulja, kiseline, ispusne vode kanalizacije, umjetna gnojiva itd. Nisu štetne primjese mineralnih ulja, otpadne vode pivovara, tvornica sapuna itd.

Preporučuje se ispitivati koncentraciju vodikovih iona pH prema Sörrensenu, koji je uveo taj način za označavanje koncentracije iona vodika, što dakle označuje ionsku reakciju, odnosno hidrometrijski stupanj otopine.

Kemijski čista voda je neutralna tekućina, pa je pH = 7

Tekućine s kiselom reakcijom imaju pH < 7, a bazične ili alkalne reakcije pH>7.

Oznaka pH je logaritam recipročne vrijednosti H^+, odnosno $(OH)^-$. Dakle

$$pH = \log \frac{1}{1 \cdot 10^{-7}} = \log 1 - \log 1 \cdot 10^{-7} = 7$$

O vrijednosti pH vode ovise uslovi vezanja i stvrdnjavanja betona. Vode sa pH od 6 do 8 smatraju se neutralnim, što odgovara pitkoj vodi vodovoda. Za miješanje betona mogu se upotrijebiti vode s vrijednosti pH od 5 do 8.

Jugoslavenski standard U.MI.014 smatra vodu štetnom za beton kada je pH manje od 6, a jako štetnom kada je pH manje od 5. Štetna tekuća voda opasnija je od štetne stajaće vode, jer u tekućoj vodi škodljivi se sastojci stalno obnavljaju.

Unatoč ovom ispitivanju ukoliko vode nisu neutralne, treba učiniti kemijsku analizu da se ustanovi vrst soli i ispita kakav je utjecaj tih soli na cement. Da smanjimo opseg hemijskih ispitivanja najčešće će biti dovoljno da se ispita npr. samo ona sol koja daje nepovoljan pH.

Vode Jadranskog mora uz obalu reagiraju bazično, a vrijednost pH iznosi oko 8,20.

Vrijednost pH ispitivane vode lako se i brzo ustanovi tzv. indikatorskim papirom. Komad takva papira uroni se u vodu koja se ispituje. Prema

reakciji papir mijenja boju, koju uspoređujemo sa skalom boja. Svaka boja u skali označuje određeni pH.

Razmotrimo sada upotrebu morske vode za miješanje betona. Ovdje govorim o betonu koji upotrebljavamo za pomorske radove, a ne o betonima koje ugrađujemo u zgradarstvu, gdje bi eventualna higroskopnost betona bila neugodna.

O pitanju upotrebe morske vode kod izrade betona i za podmorske radove postoje kod pojedinih stručnjaka potpuno suprotna gledišta. Jedni smatraju da je miješanje betona s morskom vodom velika greška, drugi, da morska voda ne šteti betonu, a ima ih koji smatraju da je i korisna.

Naši »Privremeni tehnički propisi za pomorsko,građevne radove i nabavke, od godine 1951. u tački III/7, zabranjuju upotrebu morske vode za spravljanje betona.

Zabranu upotrebe morske vode prema našim Privremenim propisima smatram danas već zastarjelim gledanjem, koje traži izmjenu. 1957. g. donio je Sekretarijat za građevinarstvo SRH stanovite izmjene citiranih propisa na osnovi rezultata novijih istraživanja, pa je time svakako učinjen korak naprijed do donošenja novih propisa.

Prema tim promjenama u pogledu upotrebe morske vode kod miješanja betona stoji: »...za miješanje betona izuzetno se može upotrijebiti morska voda. Morska voda ne smije se upotrijebiti kod aluminoznog cementa«.

Interesantno je da u Jugoslavenskom standardu U.MI.014/1959. u tački 5.6. stoji: »Morska voda može se uopće bez dvoumljenja upotrijebiti za spravljanje betona, osim za beton od aluminoznog cementa.« Ova suprotnost s našim PTP za pomorske radove sasvim je razumljiva, jer JUS je novijih i modernijih gledanja, ali baš to i traži izmjenu PTP, jer ovako stvara zabunu kod naših stručnjaka, naročito mlađih.

Priznati njemački autoriteti Kleinlogel i Grün dopuštaju upotrebu morske vode kao neškodljivu. Faury kaže slijedeće: »Iskustvo je pokazalo da svi cementi savršeno podnose za miješanje morsku vodu, osim aluminoznih cemenata u izvjesnim slučajevima.«

U Francuskoj su vršeni pokusi u Centralnom laboratoriju Des Ponts et Chaussées na pucolanskom cementu CPMF broj 1 i 2. Ispitivana je čvrstoća na tlak i vlak i to nakon 7 i 28 dana za beton pravljen morskom i slatkom vodom i držan u moru. Uzorci od CPMF br. 1 ispitivani na tlak, spravljeni i čuvani u slatkoj vodi, imali su nakon 7 i 28 dana srednju čvrstoću 290 i 462 kp/cm², a oni spravljeni s morskom vodom i čuvani u moru 343 i 475 kp/cm².

Vlak postignut na osmicama spravljenim i čuvanim u slatkoj vodi nakon 7 i 28 dana bio je postignut sa 26 i 27 kp/cm², a spravljen i čuvan u moru 32 i 40 kp/cm².

S cementom CPMF br. 2 dobiveni su rezultati za tlak 318 i 417 kp/cm² s pitkom vodom, a 344 i 472 kp/cm² s morskom.

Čvrstoća na vlak iste starosti 26 i 35 kp/cm² sa slatkom vodom, a 35 i 42 kp/cm² s morskom.

I kod nas su vršeni isti pokusi s našim cementom i pucolanom u Zavodu za raziskavu materijala u Ljubljani, za potrebe tvornice cementa u Umagu, te su dobiveni ovi rezultati:

Srednja čvrstoća na tlak betona spravljenog sa slatkom vodom nakon 7 dana 183 kp/cm², a nakon 28 dana 269 kp/cm², dok je ista mješavina izrađena s morskom vodom dala rezultate nakon 7 dana 199 kp/cm², a nakon 28 dana 277 kp/cm².

Iz ovih se rezultata vidi u prvom redu spojivost pucolanskog cementa s morskom vodom, a osim toga je opaženo lagano ubrzanje stvrdnjavanja pucolanskog cementa, odnosno betona, u prvim stadijima vezanja, kada se beton spravljao s morskom vodom. Uopće izgleda da problem upotrebe slatke ili morske vode za budući podmorski beton nije tako bitan, već treba voditi više računa o drugim, daleko važnijim faktorima, da bismo dobili gust, nepropustan i otporan beton.

U količini morske vode kojom miješam 1 m³ betona ima svega 5...6 kg rastopljenih soli. Od tih 6 kg soli oko 5 kg otpada na NaCl, a na sulfate i MgCl otpada na svaku grupu cca 0,5 kg. Prisustvo NaCl teoretski bi produžilo vezanje cementa i smanjilo nešto malo čvrstoću betona. Međutim količina od 5 kg mala je i vidjelo se na pokusima da su utjecaji ostalih reakcija čak povećali reakciju u obratnom smjeru.

Male količine sulfata, koji inače napadaju beton, reagiraju s cementom već pri miješanju. Nakon spajanja sulfati su neškodljivi, a cement koji s njima reagira nije više uporabljiv.

Francuske norme (AFNOR) toleriraju da se od sulfida i sulfata naročito sadra i anhidrid ili sulfidni anhidrid (SO_3) mogu kao nečistoća nalaziti u betonu 1,2 grama na dm³, što znači 1,2 kg na 1 m³, ako su ti spojevi rastopljeni ili usitnjeni. Ta tolerancija važi za izradu najboljih vrsta betona.

Kako u 1 m³ betona imamo oko 400 kg cementa, količina paraliziranog cementa tek je dio jednog postotka koji uopće nema utjecaja. Uzme li se u obzir kolike mogu često biti uštede ako za miješanje betona koristimo morsku vodu, umjesto da iz daljine dopremamo slatku vodu, od čega nemamo nikakve prave koristi, treba to pitanje i kod nas temeljito razmotriti i dopustiti njenu upotrebu.

Vodocementni faktor za betone u pomorskim radovima. O utjecaju vodocementnog faktora na čvrstoću i ostale karakteristike betona neću govoriti, jer to je u stručnoj literaturi o betonu i armiranom betonu dovoljno objašnjeno.

Kada određujemo količinu vode koju dodajemo cementu i agregatu trebamo voditi računa i o vlažnosti agregata, naročito pijeska, jer ta količina vode često može biti i znatna. Ako tu vodu ne uzimamo u obzir možemo često dobiti sasvim krivu vrijednost vodocementnog faktora, a time u vezi i iznenađujuće osobine betona.

Radi ravnanja dajem približne podatke o vlažnosti pijeska i krupnog agregata u različitim uslovima. Za duže suše sadržina vode u agregatu praktički je jednaka nuli. Za duže naoblake i vlažnog uzduha vlaga u pijesku iznosi oko 2%, a u krupnom agregatu 0%. Za vrijeme kiša voda u pijesku može doseći i 10%, a u šljunku oko 1%.

Pokusima je pokazano kako tlačna čvrstoća cementnog morta naglo opada s povećanjem vodocementnog faktora:

Za v/c = 0,4 tlačna čvrstoća iznosila je 300 kp/cm²
Za v/c = 0,5 tlačna čvrstoća iznosila je 200 kp/cm²
Za v/c = 0,6 tlačna čvrstoća iznosila je 140 kp/cm²

Povećanjem vlažnosti šljunka za 3 ili 5% iznosi povećanje količine vode 60 odnosno 100 l, ako je težina šljunka i pijeska 2000 kg/m³. Ukoliko smo željeli imati vodocementni faktor v/c = 0,4 i smjesu od 300 kg cementa, dobivamo novi nepredviđeni vodocementni faktor v/c = 0,60, odnosno 0,73, ako nismo uzeli u obzir vlažnost šljunka i pijeska.

Iz ovog se vidi da je važnije održavanje pravilnog vodocementnog faktora, odnosno pravilnog dodavanja vode, nego održavanje tačnog sastava granulacije agregata, jer utjecaj prevelikog dodatka vode u betonu jače djeluje na pad čvrstoće i gustoće betona nego manje greške u granulometrijskom sastavu agregata.

Podmorski beton mora biti gust, nepropustan i otporan. Da se postignu te osobine nije dovoljno voditi računa o vrsti i količini cementa, te pravilnoj granulaciji agregata, već tu vrlo važnu ulogu igra i količina vode koja se pri miješanju dodaje betonu. Beton koji ostaje na zraku nakon vezanja polako gubi suvišnu vodu koja je u betonu ostala u obliku kapljica. Voda polako ishlapljuje ili se i dalje troši na kasniju hidrataciju, a na njezino mjesto ulazi u betonsku masu zrak i beton postaje porozan. Ako beton s velikim dodatkom vode uronimo u more, negativne posljedice bit će neugodnije. Morska voda koja djeluje pod pritiskom ulazi u beton i dolazi do miješanja sa slatkom vodom. Takav porozni beton napadan je izvana i iznutra morskom vodom, te brže dolazi do korozije i njegova propadanja.

Kada je agregat mokar nakon kiša, količinu vode lako odredimo mjerenjem težine mokrog i suhog agregata i tako ustanovimo razliku koja predstavlja težinu vode u agregatu.

Količinu vode u vlažnom morskom pijesku može se izračunati i empiričkom formulom. Dobiveni rezultati su orijentacioni, ali nas upozoravaju da o toj vodi treba voditi računa

$$K_v = \frac{130}{\sqrt[3]{d \cdot D}}$$

gdje je

K_v = količina vode u litrama, koju sadrži m³ vlažnog morskog pijeska

d i D = su promjeri najmanjih i najvećih zrnaca pijeska, koji karakteriziraju ispitivanu smjesu. Dimenzije zrnaca uzimaju se u milimetrima.

Naši PTP za pomorsko-građevne radove predviđaju kao pravilnu konzistenciju betona dodatak vode od 10...14% težine suhe mješavine. Ovaj je podatak samo orijentacioni, a najčešće prebogat dodatnom vodom, pa zato u svakom slučaju treba količinu vode posebno odrediti.

Ako izaberemo željenu konzistenciju betona, odnosno izmjerimo slijeganje betona, iz Abramsova konusa, možemo odrediti količinu vode prema empiričkoj formuli

$$V = 5s + (V_0 + 20)$$

gdje je:

V = ukupna potrebna količina vode u litrama,

s = slijeganje Abramsova konusa u cm,

V_0 = količina vode u litrama, koja ovisi o veličini i obliku zrna agregata.

Kao orijentacija određivanja slijeganja Abramsova konusa za različite konzistencije betona, a prema određenoj namjeni, može se uzeti:
za nearmirani beton velikih presjeka s = 0...1 cm,
za betonske zidove armirane, debljine 20 cm i više s = 2..5 cm.

V_0 za krupni kameni agregat

Tablica 7

Vrst kamenog agregata	Maksimalna veličina zrna u mm	V_0 u litrama
Šljunak	80 60 40	130 140 150
Tucanik	80 60 40	150 160 170

Primjer: Traži se potrebna količina vode za spravljanje betona obalnog zida velikog presjeka. Agregat je tucanik veličine do 60 mm, i pijesak Za masivne betone s = 1

$V = 5 \cdot 1 + (160 + 20) = 185$ l vode za 1 m³ gotova betona.

Veličine V/C za betone u moru po GOST-u 4801—49 (SSSR)

Tablica 8

Vrst betona	Betonske i malo armirane masivne konstrukcije	Armirane betonske konstrukcije
U zoni promjenljivog nivoa vode u umjerenim i blagim klimatskim uslovima	0,55	0,60
U podvodnoj zoni a) nosivih b) nenosivih	0,55 0.60	0.60 0,65
U nadvodnoj zoni povremenog močenja betona	0,65	0.70

Opaska

Blagi klimatski uslovi : srednja mjesečna temperatura najhladnijeg mjeseca ne niža od —5 °C.

Umjereni klimatski uslovi: isto kao gore, gdje se temperatura kreće od —5 do —15 °C.

Za aluminozne cemente gornje veličine vodocementnog faktora mogu se povećati za 0,05.

Na kraju upozoravam da za istu konzistenciju betona, ako je upotrebljen kao agregat šljunak i pijesak s oblim ivicama, ili agregat drobljen, uglat i oštrozrnat, potrebna količina vode stoji u omjeru 1 : 1,20 do 1,25.

UPOTREBLJENA LITERATURA

V. V. Kind: *Korozija cementa i betona u hidrotehničkim objektima.*
I. A. Koronov: *Morskie sooruženiy iz betona i železobetona.* Moskva, 1950.
M. Duriez: *Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments.* Travaux, 1952, br. 3—7.
J. Faury: *Le béton,* Paris, 1944.
E. Wetzel: *Zur Frage der Zuschlagstoffzuteilung bei der Betonbereitung.* Die Bautechnik br. 1, 1962
A. Kleinlogel: *Einflüsse auf Beton*
E. Mörsch: *Der Eisenbeton.* Bd. I.
A. Hummel: *Das Beton — ABC.*
R. Grün: *So macht man guten Beton.*
V. Juranović: *Beton i armirani beton.* Svezak I.
I. Celmić: *Uticaj morske vode na beton.* Građevinar br. 6, 1957.

RAZLIČITE VRSTE AGREGATA ZA BETON

Ranije se smatralo da je agregat za beton inertni materijal, koji povezan s veznim sredstvom daje beton. Kasnijim se ispitivanjima dokazalo da je većina agregata u betonu aktivna, a ne inertna, te da dolazi do kemijskih, fizikalnih ili termičkih promjena, pojedinačno ili kombinirano.

Upravo poznavanje tih promjena koje izaziva neki agregat, a koje mogu biti i vrlo neugodne za čvrstoću i trajnost betona, često su odlučujuće za izbor agregata.

Unutarnja građa, struktura i mineraloško-petrografski sastav agregata određuju njihovu kemijsku, fizikalnu i termičku stabilnost, a sve zajedno pridonosi karakteristikama izrađenog betona. ASTM (American Society for Testing of Material) daju novu definiciju za agregat:

Agregat je skup prirodnih ili umjetnih neorganskih čestica propisane gradacije, koje povezane veznim sredstvom daju beton.

Kada pristupamo otvaranju nekog značajnijeg gradilišta, na kome će betonski radovi biti jače zastupani, trebamo odmah pomišljati na najbliža nalazišta agregata iz kojih će se moći dobavljati kvalitetan materijal u dovoljnim količinama i odgovarajućem sastavu, a uz to voditi računa i o ekonomičnosti.

Ovdje ću govoriti o tim problemima, jer oni su vrlo važni za kvalitet betona koji želimo postići, a na koje se često olako gleda, zadovoljavajući se time da agregata ima dovoljno i da će transport biti jeftin.

Smatram da je tu neophodna suradnja s geologom-petrografom, ali isto je tako potrebno da i mi građevinari poznajemo glavnije faktore koji utječu na svojstva agregata i budućeg betona, i to betona koji će se upotrijebiti za zadanu primjenu. Za izbor značajnijeg nalazišta, uz geologa bit će potreban i kemičar, a na osnovi jedne i druge studije moći će građevinski inženjer stvoriti konačnu odluku i učiniti definitivnu kalkulaciju. Da bi se građevinski stručnjak mogao odlučiti i da bi mogao koristiti ekspertize geologa i kemičara, potrebno je da i on ovlada tom materijom barem u načelnim pitanjima, te da rezultate njihovih istraživanja znade pravilno primijeniti, odnosno postavljati takva konkretna pitanja, čiji će mu odgovori po redosljedu važnosti konačno reći kakav je izabrani agregat.

Ovdje bih želio napomenuti interesantne rezultate do kojih se došlo ispitivanjima u Institutu za ispitivanje materijala SR Srbije u Beogradu 1960. i 1961. g. koji su pokusi pokazali od kolike je koristi upravo za pomorske radove upotreba stanovite vrste agregata s obzirom na otpornost betona protiv korozije morske vode. Ta ispitivanja vršena su kao daljnje istraživanje

rezultata dobivenih u Norveškoj, gdje se opazilo da beton izrađen od agregata vapnenca pokazuje veliku otpornost kroz nekoliko decenija, iako se radilo o nekim podmorskim objektima.

Rezultati naših ispitivanja pokazuju da su betoni izrađeni s kremenim pijeskom manje otporni na ubrzanu koroziju od onih s pijeskom vapnenca. Otpornost betona izrađenog s pijeskom vapnenca i portland-cementom pokazala se dva puta većom od otpornosti istog betona izrađenog s kremenim pijeskom, a da su pri tome i granična naprezanja na vlak bila znatno povećana.

Beton je bio izrađen od portland-cementa s mješavinom agregata koji sadrži sitnu frakciju 0,5/1,0 cm agregata vapnenca, a ostale frakcije od kremenog agregata, dakle 33% agregata bio je vapnenac, a 67% kremeni agregat. Pokazalo se da je takav beton bio i oko dva puta otporniji na koroziju nego beton izrađen od pucolanskog cementa i kremenog agregata.

Ovim je pokusima ukazano od kolike je važnosti poznavanje pojedine vrste agregata u geološko-petrografskom pogledu, i kako njihov izbor često daje i neočekivane karakteristike betona. To su razlozi zašto se želim malo više pozabaviti pitanjem izbora agregata, njihovih vrsta i svojstava.

Prema postanku, stijene dijelimo u tri grupe: eruptivne, sedimentne i metamorfne.

Eruptivne stijene nastale su hlađenjem rastaljene magme ili lave; to su uglavnom silikatne stijene. Njihova struktura ovisi o brzini hlađenja, a može biti kristalna ili staklasta, ili njihova kombinacija.

Ako se rastaljena viskozna magma, zasićena plinovima i parama, hladi i kristalizira dublje ispod površine zemlje, nastaju tzv. plutonske ili dubinske stijene, koje su najčešće zrnaste, guste ili slabo porozne. Plutonske stijene imaju obično odlične kvalitete betonskog agregata.

Ako magma izbija na površinu naziva se lavom, koja se brzo hladi i poprima staklastu građu. Takove stijene nazivamo vulkanskim ili površinskim stijenama, a oblikom su pločaste i mjestimično porozne, zbog izlaska plinova za vrijeme hlađenja.

Mnoge od njih reagiraju nepovoljno s alkalijama portland-cementa. Izdvajanjem plinova i para lava se naglo skrućuje i tako nastaje lagan materijal, zvan plovučac. Njegova prostorna težina kreće se oko 0,95 Mp/m³, pa kao lakši od vode pliva na površini. Upotrebljava se mnogo za izradu laganih betona.

Od plutonskih stijena spominjem granit, sijenit, diorit, gabro itd., a od vulkanskih andezit, bazalt, diabaz, trahit, plovućac itd. Eruptivne stijene guste su ili porozne, a kao agregat vrlo su dobre, iako u betonu kemijski aktivne.

Na primorskom području naše zemlje vulkanska djelatnost bila je razmjerno vrlo slaba, pa stoga nema ni jačih nalazišta vulkanskih stijena.

Bazalta imade južno od Donjeg Pazarišta u Velebitu, amfibolskog porfirita u Senjskoj Dragi ispod Vratnika kod Senja, diabaznog porfirita kod Zrmanje i Knina, diorita kod Vrlike i Sinja, a diabaza između Budve i Bara.

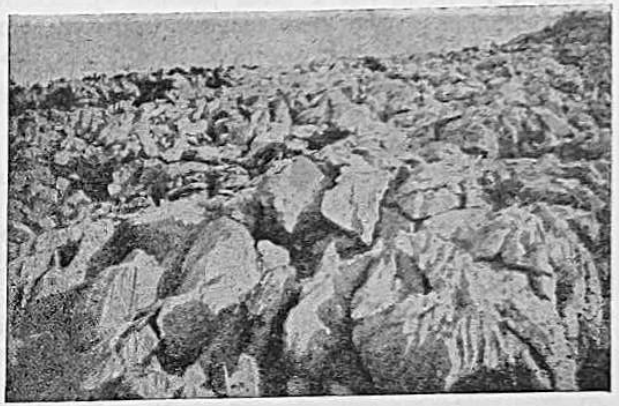
Sedimentne ili taložne stijene nastale su fizikalnim i kemijskim promjenama postojećih stijena na površini Zemlje. Tako nastali materijali prenošeni su vodom, ledom, vjetrom i ponovno taloženi i konsolidirani prirodnim veznim sredstvom, koje je donosila prodiruća voda.

Sedimentni su vapnenci, dolomiti, pješčari, škriljaste gline itd., koji predstavljaju glavnine stijena našeg dinarskog primorskog pojasa. Karakteristična forma većine sedimentnih stijena jest fina zrnasta struktura i slojevitost.

Masivni vapnenac daje najbolji agregat, a budući da je u našem primorskom kraju jako zastupan, za nas je vrlo značajan.

Dinarski krš, koji se proteže od donje Soče do juga Balkanskog poluotoka, izgrađen je uglavnom od naslaga karbonatskih stijena s oštrim i razvijenim krškim morfološkim oblicima. Mjestimice imade i škriljevaca, te vapnenih i flišnih pješčenjaka.

Pješčenjaka imade dobrih, ali i slabih kao betonski agregat. Slabi su oni gdje je slabo vezno sredstvo, pa takvi pješčenjaci postaju porozni i trošni. Nalazišta kremenog pijeska otkrivena su kraj Pule u Istri.



Slika 1. Velebitski krš iznad Jablanca: razlomljeni i isprani gornjokredni kršnik. (Snimio J. Poljak)

Općenito se može kazati da su gorski hrptovi primorskog pojasa od vapnenaca, a uvale od fliša, kao Velebit, Kozjak, Mosor i Biokovo. Vapnenci često imaju proslojke škriljaca, kaverne i kanale ispunjene onečišćenim glinama ili uklopke kalcedona, koji ako dođu u agregat mogu izazvati promjene betona, uglavnom radi mijenjanja volumena uslijed primanja većih količina vode.

Dolomit kao agregat za beton nije preporučljiv jer se lako kala i drobi.

Škriljci u agregatu obično su plosnata oblika, krhki i nestabilni, pa ih treba izbjegavati.

Metamorfne stijene nastale su od eruptivnih ili sedimentnih stijena kod povišene temperature i pritiska, pri čemu je dolazilo do rekristalizacije i formiranja novih minerala. Karakteristika tih stijena jest škriljavost i dosta velika čvrstoća. Kad se upotrebljava za agregat mora se biti na oprezu, i treba ga birati.

Upoznavši se u glavnim crtama sa kategorizacijom stijena od kojih dobivamo u daljnjem procesu agregat za beton, spomenut ćemo kao najčešći materijal za beton drobljeni krupni agregat i pijesak, ili prirodni šljunak i pijesak.

Drobljeni agregat dobiva se lomljenjem prirodnih stijena, drobljenjem, mljevenjem i prosijavanjem. Drobljenac se najčešće upotrebljava za krupnije frakcije, dok se za pijesak preporučuje prirodni pijesak, o čemu će još biti govora.

Danas, naročito u Americi, imade specijalnih drobilica i mlinova sa šipkama koji daju već vrlo uporabljiv drobljeni pijesak, ali u nas, naročito u primorskim područjima, gdje ima mnogo kvalitetnog prirodnog pijeska odlične vrste, nije se ukazala potreba za njegovom proizvodnjom.

Beton spravljen s drobljencem oporiji je, a traži više cementa i vode za zadanu marku betona nego od prirodnog šljunka; betoni spravljeni s drobljencem imaju veće čvrstoće i otporniji su protiv smrzavice i otkravljivanja. Oblik zrna to je bolji što se više približuje kocki, dok plosnate i izdužene čestice loše utječu na obradivost, čvrstoću i trajnost betona. Forma zrna ovisi o karakteru materijala od kojeg je drobljen i o načinu drobljenja.

Pri izradi drobljenca moram upozoriti na jednu stalnu popratnu pojavu kojoj se često ne poklanja dovoljno pažnje, naime drobljenac je onečišćen s manje ili više kamene prašine, tj. zrnaca manjih od 0,1 mm. Ta kamena prašina prolazi kroz najsitnije sito za cement. Što je kameni materijal koji se drobi slabije kvalitete, drobljenac ima više prašine.

Kamena prašina upija znatne količine vode, pa je radi obradivosti betona potrebno dodavati više vode, tako raste vodocementni faktor, čime smanjujemo čvrstoću i pogoršavamo kvalitet betona. Da to predusretnemo trebali bismo dodavati više cementa kako bi zadržali vrijednost predviđenog vodocementnog faktora, a to u prvom redu nije ekonomično.

Daljnji nedostatak kamene prašine u betonu jest taj što prašina prianja uz vlažnu površinu većih zrnaca agregata, čime također umanjuje čvrstoću betona.

Francuski propisi dopuštaju za betone učinjene s najmanje 300 kg cementa na kubni metar, te miješane s drobljenim pijeskom, količinu kamene prašine do 5% težine pijeska, maksimalne veličine zrna 6,3 mm. Ako su zrna pijeska oblih ivica, kamena prašina mora da bude isključena.

Ako se izrađuju mršavi betoni dodavanje kamene prašine od koristi je, jer ispunjava šupljine između zrna agregata koje ne može ispuniti sam cement, jer ga je premalo. Takva dodana kamena prašina mora da bude mljevena od vrlo tvrda kamena.

Ovdje napominjem da se spomenuti kameni prah ne smije zamijeniti s kamenom prašinom koja je nastala drobljenjem krupnijeg kamenog agregata, te koja je ostala na kamenim zrncima. Ona je uvijek štetna i treba je odstraniti jer nam kvari kvalitet betona, pa i onog mršavog. Naši Privremeni tehnički propisi za beton i armirani beton, te Uputstva za njihovu primjenu, kažu o agregatu ovo:

Ako se agregat sastoji od drobljenog ili tucanog kamena čvrstoća toga kamena na pritisak u suhom stanju ne smije iznositi ispod 800 kp/cm². Kamenje koje se raspada ne bi trebalo da pređe 4% od agregata preko 8 mm zrna.

Muljeviti sastojci (materijal koji prolazi kroz sito od 0,088 mm otvora rupa), ne samo po svojoj količini, već i po svojoj vrsti, utječu na čvrstoću betona. Ako su oni od gline ili ilovače, onda već sadržina od preko 2% ukupne težine agregata utječe na opadanje čvrstoće betona, dok čisto kvarcno i krečnjačko brašno do 3% može čak i da poboljša kvalitet betona i u pogledu obradivosti i u pogledu čvrstoće.

Naročito je škodljivo ako mulj i nečistoća obavijaju ili su priljepljeni za pojedina zrna kamenog agregata u vidu skramice, jer te skramice sprečavaju vezu između cementa i površine zrna, a humus još sprečava i proces očvršćavanja cementa.

Ako sadržina muljevitih sastojaka pređe granice dopuštene Propisima, treba izvršiti pranje kamenog agregata. Pranje agregata koji sadrži muljevite sastojke u vidu prašine, tj. odvojeno od zrna agregata, može biti štetno ako nije izvršeno temeljito, jer se od prašine obrazuju grumenčići koji utječu još nepovoljnije na kvalitet betona.

Općenito, pri izboru kamena za agregat betona treba poznavati ove glavne karakteristike kamena:

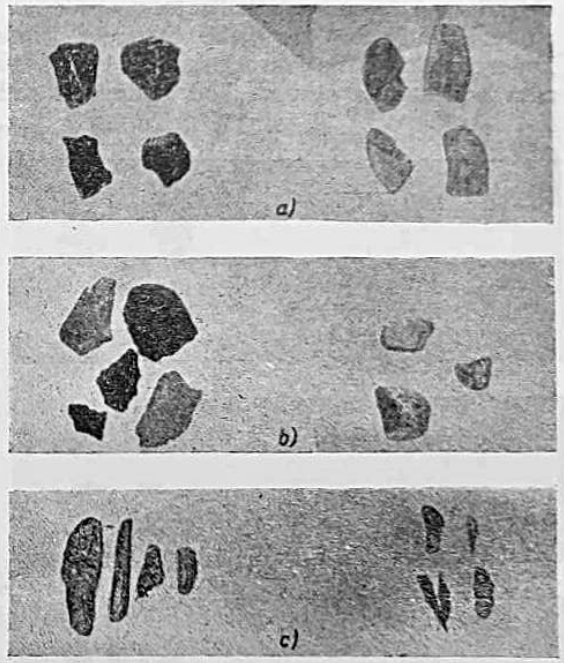
1) Fizikalne i kemijske karakteristike kamena s obzirom na čvrstoću i otpornost, te njegovu kemijsku spojivost s drugim materijalima kad se stavi u betonsku smjesu.
2) Čistoću smjese.
3) Oblik zrna.
4) Oblik i osobine površine zrna.

Poroznost agregata bliže površini utječe na prionljivost između agregata i veziva. Površinska hrapavost određuje veličinu prianjanja i još nepoznate procese stvrdnjavanja betona.

Agregati sa suviše sitnim porama ne omogućuju ulaz kristala hidratiziranog cementa u agregat, te ne dolazi do dobre veze između cementnog veziva i agregata.

Prirodni pijesak i šljunak predstavljaju drugu važnu skupinu agregata sastavljenih najčešće od zaobljenih zrnaca. Nalazišta prirodnog agregata mogu se podijeliti prema načinu postanka:

1) Šljunak i pijesak deponirani u koritima i na obalama sadanjih potoka i rijeka, nošenih i taloženih vodom.
2) Depoziti nekadašnjih riječnih korita nanijeti vodom u nekom ranijem geološkom periodu, tzv. terasni depoziti.
3) Depoziti sitnijeg materijala poplavnih područja rijeka.
4) Aluvijalni naplavljeni nanosi nastali u ušćima klisura i vododerina doneseni bujicama.



Slika 2. Različiti oblici drobljenog agregata
a) Uglata i poluuglata oštrobrida zrna, dobar oblik za agregat — b) Zaobljena plosnata zrna; srednje kvalitetan oblik za agregat — c) Izdužena igličasta zrna; loš oblik za agregat

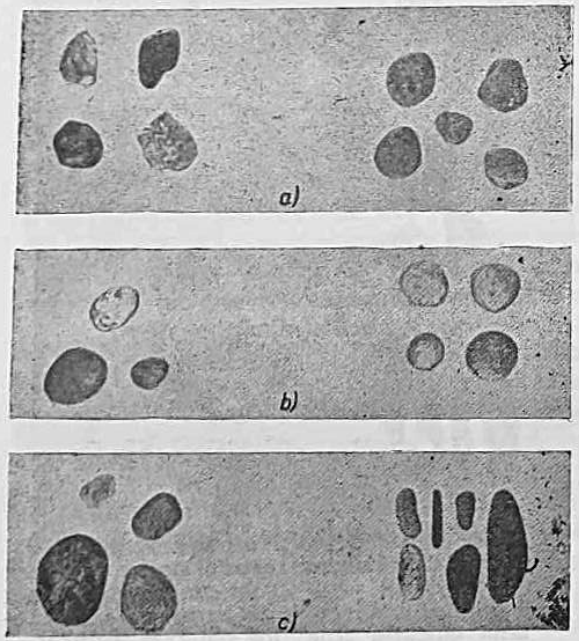
5) Eolski depoziti obično su finozrnati sitni pijesci naneseni vjetrom.
6) Glacijalni depoziti naneseni lavinama i morenama pri otapanju ledenjaka.
7) Depoziti uz morske obale, naneseni djelovanjem morskih struja i valova.

Šljunak i pijesak nošeni vodom najčešće su vrlo raznoliki po svojoj mineraloško-petrografskoj građi i granulaciji. Kako rijeke i potoci prolaze različitim geološkim područjima, nose sa sobom i trošinu onakvog sastava kakove su stijene od kojih su područja izgrađena.

Prirodni pijesak i šljunak sastoje se uglavnom od zrna zaokruženih i zaobljenih ivica, te kao agregat daju obradiv beton, s minimalnom potrebom vode i cementa.

I kod prirodnog agregata može se vršiti klasifikacija oblika zrnja. Oblik zrna ovisan je o sastavu agregata, dužini prevaljenog puta kojim ga je nosila voda, brzini vode, te ostalim mehaničkim utjecajima, hemijskom rastvaranju itd. Imademo zaobljene i okrugle ili sferične čestice, koje su po obliku za agregat najpovoljnije.

Poluuglate i zaobljene čestice s jasnim do zaobljenim bridovima također su prikladne kao agregat za beton. Tanke, plosnate i izdužene čestice nisu podesne za agregat kod betonskih radova.



Slika 3. Različiti oblici prirodnog šljunka
a) Bridovi oštri do zaobljeni, oblik sferičan do kuglast; odličan agregat s obzirom na oblik zrna — b) Zaobljena i okrugla zrna; oblik vrlo dobar za agregat — c) Tanka, plosnata i izdužena zrna; oblik nepodesan za agregat

U granulometrijskom sastavu prirodni šljunak i pijesak često vrlo variraju u ovisnosti o sloju i mjestu gdje se vade. Obično ima nekog zrnja određene veličine previše ili premalo, a drugih pak veličina nedostaje. Zbog tih razloga beton od prirodnog šljunka i pijeska nemoguće je izrađivati jednolike strukture, pa je potrebno takav agregat redovno popravljati prosijavanjem, separiranjem i drobljenjem, kako bismo dobili procent pojedinih frakcija zrnja onih veličina koje želimo.

Šljunak i pijesak doplavljeni vodom u riječnim koritima imaju spram glacijalnih ili vjetrom nanesenih depozita mnogo bolje balansiranu granulometrijsku strukturu.

Poznavanje regionalne geologije, hidrologije i topografije daje nam važne elemente za ocjenu riječnog nalazišta šljunka i pijeska. Depoziti uzvodno sastoje se od krupnijeg šljunka, a što se ide više nizvodno, gdje je brzina vode sve manja i manja, depoziti nanosa sastoje se od sve finijeg i sitnijeg pijeska.

U tom procesu usitnjavanja zrnja i čestica agregata igra važnu ulogu i trošenje, udar i izvjetravanje, te otapanje veznog sredstva koje je spajalo pojedine čestice.

Već je u poglavlju u kojem sam razmatrao drobljenac kao agregat za izradu betona spomenuto da pijesak treba da bude okrugla zrnja, a ne oštrozrnat. Taj se uslov postavlja da bi se dobila potrebna ugradivost betona a da se ne dodaju veće količine vode i cementa.

Pijesak je uopće važan sastojak agregata i znatno utječe na čvrstoću betona. Zbog toga je nužno da upotrebljeni pijesak potječe od tvrda kamena, što je važnije nego da šljunak ima naročitu čvrstoću.

Ne može se izraditi kvalitetan beton ako je pijesak mekan, od trošna materijala.

Kad govorimo o pijesku i šljunku treba da damo i granicu veličina do kojih se agregat zove pijesak, odnosno kada prelazi u područje šljunka.

Francusko Udruženje za normiranje (AFNOR) daje ovu definiciju za pijesak i šljunak s obzirom na dimenzije:

d = veličina najmanjeg zrna neke grupe u milimetrima
D = veličina najvećeg zrna neke grupe u milimetrima

Kamena prašina ili mlivo		do	0,1	mm
Pijesak sitan	0,1	do	0,4	mm
Pijesak srednji	0,4	do	1,6	mm
Pijesak krupan	1,6	do	6,3	mm
Šljunak sitan	6,3	do	10	mm
Šljunak srednji	10	do	16	mm
Šljunak krupan	16	do	25	mm
Kamen zaobljenih ivica				
Kamen sitan	25	do	40	mm
Kamen srednji	40	do	63	mm
Kamen krupan	63	do	100	mm
Krupni obluci	100 i više			mm

Jasno je da projektant neće, već iz praktičkih i ekonomskih razloga, tražiti takovu detaljnu klasifikaciju agregata i sijanje tolikih frakcija, jer se dobar i kvalitetan beton može postići dobrim doziranjem mnogo manjeg broja kategorija agregata. O tome će biti pobliže govora u slijedećem poglavlju.

Za odabrani šljunak i drobljenac traži se da su na površini hrapavi, kako bi se cement i mort bolje vezali za pojedina zrna agregata, dok se jako porozan agregat ne preporučuje.

AFNOR predviđa tri vrste betona prema vrsti upotrebe:

Tip (A) odgovara najkvalitetnijem betonu visokih čvrstoća.

Tip (B) odgovara nepropusnijim betonima, i betonima otpornim na agresiju.

Tip (C) odgovara betonima za koje nepropusnost i otpornost nisu važni.

Prema istim propisima dopušta se slijedeća poroznost agregata, prema gornjoj klasifikaciji betona:

Za betone na suhu tipa (A)	5%
Za betone pod vodom tipa (B)	3%
Za betone tipa (C)	10%

Sve što je rečeno o čistoći agregata drobljenca važi i za šljunak. Treba paziti da prirodni pijesak i šljunak ne sadrže čestice ugljena, drva, treseta, ilovače itd. Treba nadalje paziti da u agregatu ne bude humusne kiseline, jer ona jako ruši aktivnost cementa. Mulj i ilovača koji pri pranju agregata zamute vodu dopuštaju se u procentima težine agregata, prema francuskim propisima, ovako:

Za tip betona (A)	2%
Za tip betona (B)	3%
Za tip betona (C)	5%

Ako upotrebljavamo pijesak sa zaobljenim ivicama, a pri izradi betona tipa (A) i (B) s najmanje 300 kg cementa, kamene prašine ne smije uopće biti u pijesku.

Naši PTP za beton i armirani beton u čl. 5, tački 4, Uputstva kažu: kako naš riječni pijesak ili šljunak sadrže obično ilovače ili gline, to se kao granica sadržine muljevitih sastojaka po težini može uzeti 2%. Zbog toga, ako se opitom utvrdi sadržina muljevitih sastojaka preko 2% po težini, treba u svakom slučaju, sačekati rezultat ispitivanja čvrstoće betona, prije nego što se donese odluka o njihovoj upotrebljivosti.

Za određivanje kvaliteta oblika zrna francuski su propisi uveli tzv. volumetrički koeficijent. Volumetrički koeficijent omjer je između volumena zrna naprama volumenu najmanje kugle opisane oko izabranog zrna.

Izmjerivši najveću dimenziju zrna dobijemo volumen opisane kugle

$$V_k = \Sigma d^3\pi/6$$

Uzmemo bez odabiranja stanoviti broj zrna i izmjerimo d svakog zrna.

Odatle lako izračunamo $\Sigma d^3\pi/6$

Sumu volumena zrna najlakše dobijemo ako sva izabrana zrna potopimo u graduiranu posudu napunjenu vodom, te direktno očitamo ukupni volumen V.

$$\text{Volumetrički koeficijent } C = \frac{V}{\Sigma d^3\pi/6}$$

Francuske norme određuju donje vrijednosti koeficijenta C:

Šljunak 12,5/25	Tip betona (A)	0,20
	Tip betona (B)	0,20
	Tip betona (C)	0,15
Za lomljeni i nelomljeni kamen 25/50	Tip betona (A)	0,15
	Tip betona (B)	0,15
	Tip betona (C)	0,12

Što je pogodniji oblik zrna to je volumetrički koeficijent veći. Pločasta i igličasta zrna koja su nepodesna kao agregat jako smanjuju volumetrički koeficijent i gornjim je odredbama ograničen procent takovih nepodesnih oblika zrnja. Radi orijentacije, navodim da igličasta zrna imaju $C = 0{,}01$, a pločasta oko 0,07.

Modul elastičnosti zrna šljunka, odnosno modul elastičnosti stijene od koje je nastao šljunak, u mnogome odlučuje o kvaliteti betona koji je od tog agregata izrađen. Tu jednako važnu ulogu igra i hrapavost površine šljunka, što je uslov za dobru prionljivost veznog sredstva za agregat.

Budući da se cementno tijesto za vrijeme stvrdnjavanja na suhu skuplja, a u vlažnoj sredini ili vodi bubri, veća će se zrna agregata, ukoliko su od tvrdog materijala, odupirati ovom skupljanju, a vezno sredstvo, koje se isteže dobiti će fine pukotine. Ako beton, veže u vodi onda takve pukotine ne nastupaju i beton je nepropustljiviji od istog betona koji je vezao na suhu.

Razmotrimo sada što se zbiva kada se skuplja cementno tijesto, pri čemu se kod dodira sa zrnima agregata stvara pritisak na ta zrna. Što je agregat veći, odnosno tvrdi, pritisak će biti veći i koncentriraniji, a ako su zrna šljunka od mekšeg materijala on će pod nastalim pritiscima mijenjati oblik i time nastale pritiske zgodnije raspodijeliti.

Iz ovog proizlazi kako je korisno da modul elastičnosti zrna agregata bude približno isti kao i onaj cementnog morta. To je moguće ako šljunak ne bude od pretvda materijala, a pijesak da bude što tvrđi. Na prvi pogled to izgleda paradoksalno, no ako uočimo da su pojedina mekša zrna šljunka stegnuta masom betona i da ta masa povećava otpornost zrnaca šljunka, bit će nam i ta pojava razjašnjena.

Interesantan primjer naveo je ing. Faury (Fori) u svojoj knjizi Le béton. Na raspolaganju je bio kvarcni kamen formiran od morskog pijeska, vrlo mek i porozan, čvrstoće na pritisak ispod 100 kp/cm². Beton izrađen s drobljenim pijeskom od ovog materijala bio je loš radi mekoće zrnaca pijeska. Ako se međutim upotrijebi šljunak od ovog materijala sa dobrim pijeskom dobiva se odličan beton čvrstoće od oko 350 kp/cm², dakle 3,5 puta veće čvrstoće od čvrstoće šljunka. Ako se umjesto ovoga šljunka uzme drobljenac vrlo tvrde stijene, uz ostale iste uslove priprave betona kao u prvom slučaju, dobit će se krući beton, ali manje otporan.

Kao daljnji depoziti šljunka i pijeska jesu tzv. terasni stariji depoziti, koji su nastali taloženjem u nekadanjim riječnim koritima nekog ranijeg geološkog perioda. Takva nalazišta danas su obično prekrivena tanjim ili debljim slojem humusa, pa kod eksploatacije treba paziti da ne dođe do onečišćenja šljunka ili pijeska humusom.

Na materijale koji leže u terasnim depozitima djeluju kroz vjekove procesi izluživanja, kemijske promjene izvjetravanja i smrzavanja, pa dolazi do razaranja agregata, koji se vremenom često počinje ponovno vezati prirodnim cementiranjem u konglomerate. Ovakvo jedno bogato nalazište prostire se u neposrednoj blizini Rijeke, na Grobničkom polju. Na području od cca 15 km² sedimentnog bazena zaokruženog brdima nalazimo vučeni nanos vrlo zbijene i ujednačene strukture pijeska i šljunka. Ocijenimo li nalazišta samo na desnoj strani ceste Rijeka—Zagreb možemo računati sa oko

2 500 000 m³ agregata, što osigurava eksploataciju za pokriće potreba građevinarstva riječkog bazena od oko 30 godina.

Sastav zrna uglavnom je vapnenac, ali u većim dubinama nailazi se i na male količine kremenog i vapneno dolomitnog pijeska.

Oblik zrnja vrlo je dobar, pa volumetrički koeficijent C iznosi oko 0,338, što ukazuje da se od tog agregata može izraditi, uz stanovite korekcije granulometrijskih odnosa, vrlo kompaktan i obradljiv beton.

Glinovitih frakcija koje nalazimo u količini 2,5...7%, a u veličini čestica koloidnih dimenzija, nalazi se različito prema dubini iskopa i mikro lokaciji. Prema veličini zrna grobnički agregat možemo podijeliti na:

Frakcije iznad	30 mm	10%
Veličine zrna	15...30 mm	18%
Veličine zrna	8...15 mm	17%
Veličine zrna	4...8	14%
Veličine zrna	2...4 mm	15%
Veličine zrna	1...2 mm	13%
Veličine zrna	0,5...1 mm	10%
Veličine zrna	0,2...0,5 mm	6%
Veličine zrna	0,2 mm	7%

Odnos šljunka naprama pijesku iznosi 35% zrna 8...30 mm, te 65% zrna 0...8 mm. Vidimo da taj odnos nije povoljan, a nije povoljan ni granulometrijski odnos samoga pijeska, pa je za postizavanje kompaktnog betona potrebno taj kopani materijal sijati i vršiti u separaciji granulometrijske korekture.

Ukoliko se teži izradi betona većih čvrstoća bit će potrebno agregat i prati, da se smanji procenat muljevitih i prašinastih sastojaka.

Specifična težina agregata kreće se od 2,60 do 2,65 p/cm³. S betonom izrađenim s grobničkim pijeskom i šljunkom, prosijani u odnosima

0...2 mm	20%
2...8 mm	25%
8...30 mm	55%

te uz dodatak 300, odnosno 350 kg portland-cementa PC—350 i uz vodocementni faktor $v/c = 0{,}52$, postigle su se čvrstoće nakon 28 dana starosti 495, odnosno 547 kp/cm² na tlak i 55, odnosno 62,4 kp/cm² na vlak. Ispitivanja su se vršila u Zavodu za ispitivanje materijala u Zagrebu.

Na ovu deponiju prirodnog šljunka i pijeska osvrnuo sam se detaljnije jer ona igra važnu ulogu u opskrbi agregatom naših kvarnerskih gradilišta već od davnine, a igrat će još i važniju u budućnosti, nakon formiranja poduzeća Betongrad koje eksploataciju usmjeruje stručnim i tehničkim putovima.

Depoziti inundacionih područja rijeka sastoje se uglavnom od sitnijeg pijeska i mulja, jer brzina je vode izvan korita mala pa se talože najsitnije čestice doplavljena agregata. Ovakve naplavine daju odličan materijal za vršenje korekcija granulometrijskih sastava pijeska kojemu nedostaju sitne frakcije.

Aluvijalne naplavine donesene bujicom za proloma oblaka taložene su obično između klisura ili kanjona. Materijal je vrlo različit, od sitnog pijeska do velikih valutaka i kamenih blokova, što je bujica silinom svoje snage dovaljala. Zbog tih je razloga taj materijal neprikladan kao agregat za beton, jer mu je granulacija vrlo neravnomjerna i nekontinuirana, najčešće bez najsitnijih frakcija. Sortiranje takvog agregata najčešće je skupo pa se ne isplati, a obično je i transport otežan.

Eolski depoziti nastali su taloženjem čestica pijeska nošenih vjetrom. To je obično fin pijesak s malim razlikama u veličini zrna, zaobljenih ivica. Takav eolski depozit je npr. les. To je prašinasta mješavina pijeska i gline s većom ili manjom količinom kvarcnog zrnja. Veličina zrnja prašinastog pijeska kreće se od 0,002 do 0,1 mm. Les se kao agregat za beton uglavnom ne koristi, osim katkada kao dodatak najfinijim frakcijama pijeska. Les se inače može koristiti kao sirovina u fabrikaciji cementa.

Kod nas u Primorju imade takav eolski depozit lesa u Savudriji kod Umaga u Istri, procijenjen na 3...4 miliona m³, a koristi se kao glinasta komponenta u produkciji cementa naše nove cementare Istracement u Umagu.

Slika 4. Glavni greben Biokova od gornjokrednih vapnenaca. U sredini slike vidljivi odronski gravitacioni depoziti. (Snimio I. Horvat)

Odronski i gravitacioni depoziti nastaju gravitacijom ispod strmih stijena uslijed izvjetravanja, smrzavanja i otkravljivanja. Sastav tog agregata odgovara sastavu matične stijene, a odronjeno kamenje uglatog je oblika, od velikih blokova do sitnijeg kamenja. Taj materijal smekšava izvjetravanjem i ispiranjem, pa mu je kvalitet lošiji od matične stijene. Kao betonski agregat rijetko se upotrebljava jer je pristup do njega obično težak i skup, a i kvalitet najčešće nije najbolji. Ovakva urvinska kretanja gravitacijom ogromna su, pa takvi depoziti koji put sadrže i više miliona m³ agregata.

Glacijalni depoziti nastali su i nastaju kada se velike mase snijega i leda sruče u doline kao lavine i morene, pri čemu ledene mase vuku u doline sav krš koji je pokrivao površinu preko koje je led klizio. Ovi ledenjaci bili su najveća transportna sredstva kamenja i odrona svih geoloških vremena.

Led u dolinama polako se topio, a krš i šljunak, pomiješani ilovačom i zemljom, ostali su deponirani u dolinama. Materijal glacijalnih depozita nije podesan kao agregat za beton jer ima velikog kamenja i nečist je, pomiješan sa zemljom, glinom, ilovačom itd. Međutim ako je taj materijal odnošen vodama koje su nastale topljenjem leda i formiran u novim depozitima i terasama, te na svom putu očišćen i sortiran, može se od njega načiniti odličan agregat za beton.

Kod nas imamo takovih terasa glacijalnog šljunka u dolini Neretve. Te terase nastale su u vrijeme ledenog doba, a nalaze se kod Jablanice, Mostara i u Mostarskom polju. Ove tri terase dokazuju da su na susjednim planinama bile i tri glacijacije.

Depoziti morskih obala mogli su nastati nanosima riječnih korita na ušćima u more, donešeni ledenjacima, ili stvoreni na samoj obali od razornog djelovanja morskih valova na obalne stijene. Zrna morskih depozita obično su zaobljena i uglavnom jednake veličine. Ako se želi morski pijesak upotrijebiti kao agregat za beton mora ga se prati, da se odstrane štetne soli morske vode.

Uzduž čitave naše obale nalaze se šljunčane i pješčane plaže bogate prirodnim agregatom za beton, pa se kao takav i upotrebljavao od davnine. Petrografski sastav tog šljunka i pijeska zavisi naravno od sastava izvornih stijena od kojih je naplavljen na obale, a sastoji se uglavnom od vapnenca, nešto pješčenjaka, dolomita itd. Između Budve i Bara nalaze se uz morsku obalu šljunčane i pješčane plaže od bijelog i žućkastog mramornog vapnenca, crnog i zelenog dijabaza i bijelog i zelenog kremena.

Ovo poglavlje o vrstama agregata za beton obradio sam nešto detaljnije, jer znam iz svoje prakse da se baš geologiji i petrografiji kod nas građevinara na terenu daje premalo važnosti. Nastojao sam ukazati na pojedine dobre i loše materijale koje susrećemo u jadranskom pojasu, kako bismo se kad nam zatreba neki materijal ili u susretu s njime mogli snaći i bar nekako orijentirati.

Podmorski radovi najčešće zahtijevaju velike mase kamenog agregata, pa i male pravilne uštednje po m^3 mogu donijeti znatne koristi.

Znam da nisam dao potpun i detaljan opis geološkog sastava primorskog pojasa. Nastojao sam samo natuknuti značajnije razvojne momente, glavne karakteristike materijala koje kod nas susrećemo, da tako potaknem mlađe da pitanju pravilnog izbora agregata posvete nužnu pažnju. U većim i ozbiljnijim građevinskim zahvatima i onako nećemo donositi odluke bez suradnje s geologom-petrografom.

UPOTREBLJENA LITERATURA

J. Cvijić: *Struktura i podela planina Balkanskog poluotoka.* Glasnik srp. kr. akademije LXIII, Beograd, 1902.

L. Marić: *Sistematska petrografija.* Zagreb, Školska knjiga, 1951.

L. Marić: *Petrografija.* Zagreb, Školska knjiga, 1951.

S. Milojević: *Pojavi i problemi krša.* Beograd, 1938.

K. Franulović: *Grobnički šljunak,* Građevinar 3—4, 1951.

I. Krapinski: *Povećanje trajnosti betona pomorskih i hidrotehničkih postrojenja na osnovi najnovijih istraživanja. Dokumentacija za građevinarstvo i arhitekturu,* br. 35—36, 1962.

J. Faury: *Le beton,* Paris, 1944.

R. F. Blanks i H. L. Kennedy: *Technology of Cement and Concrete.* New York, 1955.

R. Rhoades i R. Mielenz: *Petrography of Concrete Aggregate.*

Privremeni tehnički propisi za beton i armirani beton, 1947. g.

Uputstvo za primjenu privremenih tehničkih propisa za beton i armirani beton, 1947.

GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA

Granulometrijski sastav agregata glavni je faktor betona prema kojem se određuje potrebna količina cementa i vode, koji utječe na svojstva betona kao čvrstoću, obradljivost, nepropusnost, segregaciju, a u vezi sa svim tim svojstvima utječe i na cijenu gotova betona.

Upoznavši važnost granulometrijskog sastava nastojali su mnogi ispitivači odrediti neku idealnu liniju koja daje najpovoljniji sastav zrna agregata. Do danas ipak nije nađena neka idealna granulometrijska linija koja se može općenito prihvatiti kao najbolja, bez obzira na oblik zrna, hrapavost površine itd. Uglavnom sve teorije o sastavu veličina frakcija agregata polazile su od postavke da šupljine između većih zrna moraju da budu ispunjene sitnijim zrnima pijeska i cementa. Ali u praksi nemamo idealne oblike zrnja kugle ili kocke i to zrnje nije u betonu raspodijeljeno idealno, kako smo mi određivali minimum šupljina, pa odatle dolaze te razlike. Najsigurnije je za svaki pojedini slučaj odrediti onaj granulometrijski sastav koji će s izabranim agregatom dati beton traženih kvaliteta. Da pri tome ne lutamo i svaki puta nanovo ne pronalazimo recepture, bit će nam vodilja prokušani i ispitani procenti granulacije i priznate linije sastava agregata, koje nalazimo u stručnoj literaturi, a koje ćemo prilagoditi našem agregatu i betonu, već prema namijenjenoj svrsi.

Prije nego pređem na prikaz takovih granulometrijskih linija i prikladnih tabelarnih odnosa veličina pojedinih frakcija zrna razmotrit ćemo osnovne odnose pojedinih frakcija, te uloge koje pojedine frakcije imaju u masi betona.

Pri izboru agregata treba se odlučiti za maksimalnu veličinu agregata koju za zadani slučaj možemo upotrijebiti. Veličina najvećeg zrna ovisi o vrsti i debljini betonskih elemenata, gustoći armature, ukoliko radimo u armiranom betonu, te mogućnosti same mehanizacije, odnosno dužine transporta gotove mješavine, pri čemu može doći do segregacije. Ako ugrađujemo veća zrna potrebno je manje cementa, jer zbir površina većeg agregata koji cement mora da oblijepi manji je od zbroja površina sitnijeg agregata iste prostorne jedinice. Zbog istog razloga potrebno je manje vode, pa tako uz manji utrošak cementa imamo isti vodocementni faktor. Štedimo dakle cement, a čvrstoća betona približno je ostala ista kao betona s više cementa, a manje zrnatastih agregata.

Smanjenim dodatkom cementa smanjuje se i skupljanje betona uslijed sušenja, što je također jedna od prednosti upotrebe krupnijeg agregata.

Maksimalna veličina agregata ne smije biti veća od 1/3...1/4 najmanjeg presjeka betona, a kod armiranog betona manja od najmanjeg razmaka čeličnih uložaka. Iskustvo je pokazalo da najveća zrna agregata ne treba da su veća od 15 cm, jer veća zrna već čine poteškoće pri miješanju, ugrađivanju i vibriranju.

Odluka izvođača o upotrebi najkrupnijih zrna agregata od 8 do 10 cm, pa i većih, mora da bude vezana uz odluku da se gradilište opremi specijalnim miješalicama, transporterima i vibratorima, da se postigne kvalitetan beton.

Prema američkim iskustvima izrađena je tablica kojom se preporučuju maksimalne veličine agregata uz različite uslove.

Tablica 9

Maksimalna dimenzija betonskog presjeka u cm	Maksimalna veličina agregata u cm			
	Armirani zidovi, stupovi i grede	Nearmirani zidovi	Jako armirane ploče	Nearmirane ploče
6,25 ... 12,5	1,25 ... 1,9	1,9	1,9 ... 2,5	1,9 ... 3,75
15 ... 27,5	1,9 ... 3,75	3,75	3,75	3,75 ... 7,5
30 ... 72,5	3,75 ... 7,5	7,5	3,75 ... 7,5	7,5
75 i više	3,75 ... 7,5	15,0	3,75 ... 7,5	7,5 ... 15,0

Unatoč prednostima o kojima sam govorio kod izbora što krupnijih zrna agregata, računa treba voditi i o mogućnosti segregacije takva betona, jer što su zrna agregata veća, veće su i sile koje ga žele izbaciti iz mase betona u kojoj se nalaze. Freyssinet je dao tumačenje toj pojavi. Veće zrno agregata pliva u masi cementnog morta uslijed prianjanja njegove površine uz mort. Veličina sile prianjanja ovisi o površini zrna, dakle o kvadratu dimenzije. Sile koje teže k segregaciji većih zrna ovise o masi krupnih zrna, dakle kao kub dimenzije zrna. Prema tome, da ne dođe do segregacije potrebno je to više smanjiti odnos krupnog agregata spram sitnijeg, što su veća maksimalna zrna.

Do segregacije nadalje dolazi ako je transport izmiješanog betona dug, ako se beton za vrijeme vožnje trese, ako je prevelik dodatak vode i time smanjena prionljivost, ili ako je u smjesi premalo pijeska.

Naši PTP za beton i armirani beton u tački 6/6 kažu:

Najveći promjer zrna ovisi o dimenzijama konstruktivnih elemenata, o slobodnom prostoru između šipaka armature i između armature i oplate; osim toga ne smije preći trećinu najmanje dimenzije konstruktivnih elemenata.

Ruski propisi također dopuštaju upotrebu velikih zrna agregata, do 15 cm, ali odmah uz to propisuju potreban odnos sitnijih frakcija.

Granulometrijski sastav krupne ispune prema GOST-u 4797—49

Tablica 10

Veličina otvora sita	Najveća krupnoća	Polovina najveće krupnoće	5 mm
Maksimalni ukupni ostatak na situ u %	0 ... 5	35 ... 60	90 ... 100

Za specifičnu težinu γ_s srednja je vrijednost 2,70 Mp/m³, prema našim Uputstvima za primjenu PTP za beton i armirani beton. Bolje je γ_s izmjeriti i izračunati za svaki pojedini slučaj. Uzme se s gomile 200...300 grama osušenog materijala koji se izvaže. Izvagani uzorak potopimo zatim u graduiranu posudu napunjenu vodom. Povišena razina vode daje nam volumen čestica agregata, pa je onda, spec. težina

$$\gamma_s = \frac{\text{izmjerena ukupna težina}}{\text{ukupni volumen čestica}}$$

Pri deponiranju agregata mogu se zrna bližih frakcija skladištiti na iste gomile. Ako su zrna po veličini velikih razlika, takav agregat u gomili neće ostati jednomjerno miješan, već će se veća zrna skupljati na rubovima i pri dnu figura. U pijesku se može dopustiti da bude šljunka, tj. većih zrna, do 1/3, a da ne dođe do razdvajanja na deponiji.

Šljunak može sadržavati oko 25% pijeska a da ne dolazi do razdvajanja.

Kada se na novotvorenom gradilištu odluči za neki agregat, najčešće se uzorci šalju na ispitivanje i traži se receptura za miješanje agregata. Na mnogim gradilištima smatra se da je time sve učinjeno, a to je velika pogreška. Ispitivanja treba kontinuirano provoditi, jer pošiljke agregata po svom sastavu ne moraju biti iste, a često i nisu, pa je potrebno vršiti korekture u recepturi, ako se želi postići beton jednakih kvaliteta. I još nešto! Kada određujemo odnos pojedinih frakcija agregata ne smijemo težiti samo k onom odnosu koji nam daje najčvršći i najkvalitetniji stvrdnuti beton; treba misliti i na ugradljivost betona. Ugradljivost je to bolja, što više pijeska dodajemo našoj mješavini. Dodatkom veće količine pijeska smanjuje se međutim čvrstoća betona. Vidimo da treba voditi računa o dva uslova koji se međusobno pobijaju, pa zato je potrebno znati što se želi i kako će se to postići.

Naši PTP za beton i armirani beton i PTP za pomorsko-građevne radove propisuju Fullerov dijagram koji daje proporcije zrnastih agregata

$$P = 50\,(d/D + \sqrt{d/D})$$

$$P' = 100\sqrt{d/D}$$

gdje je

P i P' = materijal koji prođe kroz određeno sito u procentima cjelokupne težine,

D = najveći promjer zrna,

d = zrna između 0 i D.

Na slici su prečnici d sita s okruglim rupama naneseni na vodoravnoj podjeli. Za sita s kvadratnim rupama dužine strane d važi odnos $d' = 0{,}8\ d$.

Sita za fini pijesak otvora rupa 0,147 i 0,223 mm kvadratnog su otvora, dok su svi ostali otvori većih sita 0,5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 40, 50 itd. okrugli. Sita s najmanjim rupama imaju otvore kvadratnog presjeka, jer se tako sitne rupe ne bi mogle izrađivati okrugla presjeka.

Kako sam već spomenuo, u raznim državama propisana su sita koja nisu sasvim istovjetnih dimenzija otvora. Naši PTP za beton i armirani be-

Odnos frakcija pri upotrebi krupnog agregata prema GOST-u 4801—49

Tablica 11

Odvojene frakcije u mm	Najveća zrna agregata u mm					
	40	60	80	80	150	150
	Preporuka za odnos frakcija u % po težini					
5...20	45...60	35...50	25...35	—	15...25	—
5...40	—	—	—	50...65	—	30...40
20...40	40...55	—	25...35	—	15...25	—
20...60	—	50...65	—	—	—	—
40...80	—	—	35...50	—	25...35	25...35
80...150	—	—	—	35...50	30...45	30...45
Ukupno	100	100	100	100	100	100

Prema sovjetskim propisima prosijavanje pijeska i krupnog agregata vrši se na 10 sita, kojih veličina otvora opada u geometrijskoj progresiji. Veličine otvora iznose u mm: 80, 40, 20, 10, 5, 2,5, 1,2, 0,6, 0,3 i 0,15.

Za armirani beton, prema iskustvu, maksimalna veličina zrna može biti 2,5...3,0 cm. Ako je armatura gusto postavljena, eventualno i u više redova, beton koji ju obavija treba da bude sačinjen od sitnijeg agregata, da sigurno ispuni sve međuprostore između šipaka armature.

Općenito o količini ostalih frakcija zrna agregata i nekim podacima koji mogu koristiti inženjeru kao orjentacija kod izbora agregata:

O prisustvu kamene prašine ili mliva, veličine zrna manjih od 0,1 mm, već sam govorio, prisustvo tog materijala može se dopustiti u minimalnim količinama za kvalitetan beton.

Sitan pijesak veličine zrna od 0,1...0,4 mm daje betonu potrebnu plastičnost i obradljivost. Ukupna količina tog sitnog pijeska ne smije da prelazi 35% ukupne težine pijeska veličine zrna od 0,1 do 6,3 mm. Najbolje je da se taj procent kreće od 20...25%. Veći procent sitnog pijeska od preporučenog traži više cementa i vode, sa svim lošim posljedicama kao što su pad čvrstoće, poskupljenje, veće skupljanje itd.

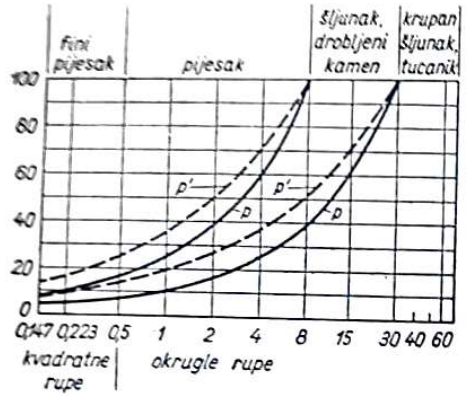
Zapreminska težina suhog pijeska u nasutom stanju iznosi oko 1500 p/l, a procent šupljina iznosi oko 37%. Jednozrnat pijesak može imati šupljina i do 50%, a pijesak pravilno granuliran i okruglih zrnaca može imati minimalan procent šupljina. Jednozrnat šljunak sadrži oko 40%, a drobljenac oko 50% šupljina.

Krupni agregat različite veličine zrna imade okruglo 30...45% šupljina, a zapreminska težina u nasutom stanju iznosi 1350...1600 kp/m³.

Zapreminski odnos pijeska prema šljunku treba da se kreće u granicama 1:2 do 1:1. Zapreminska težina šljunka i pijeska zajedno treba da je, uz pogodnu kombinaciju zrna, što je moguće veća: kod okruglog materijala 1,95...2,10 Mp/m³, kod drobljenog materijala 1,65...1,85 Mp/m³.

Šuplji prostori agregata izračunavaju se iz specifične težine i zapreminske težine, po obrascu

$$S = 100\,\frac{\gamma_s - \gamma_z}{\gamma_s}\ \text{u \%}$$



Slika 5. Dijagram linija zrnatosti agregata prema nasim PTP za beton i armirani beton (1947)

ton od 1947. g. predviđali su otvore navedene gore, dok naš JUS L. J. 9.010 predviđa ovu garnituru sita i rešeta.

sita		rešeta
0,100		—
0,200		—
0,40	ili	0,50
0,80	ili	1,00
1,60	ili	2,0
		4,0
		8,0
		16,0
		31,5
		63,0
		125,0

U Uputstvima naših PTP, tačka 6/4 i 5, kaže se:

»Ukoliko se granulometrijskim sastavom ili zbog posebnih karakteristika agregata dobije i suviše konzistentna mješavina koju je teško ugraditi, naročito u teško pristupačnim zonama s gustom armaturom, bit će obično dovoljno izabrati granulometrijski sastav bogatiji pijeskom, granulometrijska krivulja teći će tada bliže istačkanoj krivulji P', ali nije za preporuku da je siječe. Kod lomljenog agregata obično ima više šupljih prostora i za njega bolje odgovara pijeskom bogatija istačkana krivulja P'. U izvjesnim slučajevima krivulja prosijavanja morat će izaći iz navedenih granica.

Kod ugrađivanja putem vibratora ili pervibratora treba težiti idealnoj krivulji P, a ponekad se može sići i ispod nje.«

Na kraju citata naših PTP napominjem da su oni vrlo elastični. U tački 6/4 i 5 dopuštaju ovo:

»Ukoliko se prilagođavanjem granulometrijskog sastava dobije mješavina nedovoljno ugradljiva, kada se teži k preporučenom području, treba popraviti granulometrijski sastav u pogledu ugradljivosti, a krivulje prosijavanja mogu i da izlaze iz navedenih granica. Pri izboru mješavine agregata dopušteno je upotrebiti i ostale savremene metode ispitivanja granulometrijskog sastava, s time da kvalitet betona odgovara propisima.«

Ako vršimo betoniranje velikih presjeka betona opazilo se da se zrna agregata mogu razmjestiti tako da dobijemo minimalan volumen šupljina među njima. Ako pak ugrađujemo beton između oplata koje su razmjerno blizu, ili ako postoji armatura, do pravilnog razmještaja zrna ne može doći, jer smeta oplata ili armatura i procent šupljina se povećava. Francuz Caquot razradio je 1936. g. svoju teoriju »efekta zida«, koju je nekoliko godina kasnije nadopunio Faury. Taj »efekt zida ili oplate« to je veći što su veća zrna agregata, odnosno što je oplata kod tankih konstrukcija postavljena bliže. Beton uz oplatu ili između armature uslijed efekta zida ostaje porozan i neispunjenih šupljina između zrna agregata, dakle beton postaje nekompaktan, manje čvrstoće i otpornosti. Često se u takvim slučajevima dodaje više

vode betonu u uvjerenju da će židak beton bolje zaliti uske otvore i međuprostore armature. To je vrlo opasno, jer kod takvog rijetkog betona dolazi često do segregacije većih zrna koja se zaustavljaju baš iznad armature i stvaraju neispunjena gnijezda u betonu.

U takvim slučajevima treba smjesi dodavati više pijeska i cementa, čvrsto vibrirati beton, i smanjiti procent i veličinu najvećih zrna.

Za pravilno betoniranje u ovakvim slučajevima sprečavanja normalnog ispunjavanja mase betona između šipki armature ili stijena oplata uvodi Caquot nov pojam »srednjeg fiktivnog radijusa otvora«.

$$\text{Srednji fiktivni radijus } R = \frac{\text{ukupni volumen betona}}{\text{ukupna površina oplate i armature}}$$

npr.

a = maks. veličina zrna agregata = 3,0 cm

$F_b = 22 \cdot 14 = 308$ cm²

$f_z = 6 \cdot 3{,}14 = 18{,}84$ cm²

Ukupni volumen betona

$$V = (308 - 18{,}84) \cdot 1{,}0 = 289{,}16 \text{ cm}^3$$

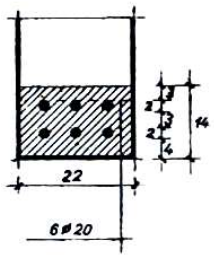
Ukupna površina armature i oplate

$$P = [(2 \cdot 14 + 22) + 6 \cdot 6{,}28] \cdot 1{,}0 = 87{,}68 \text{ cm}^2$$

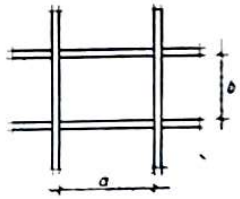
$$R = V/P = 289{,}16/87{,}68 = 3{,}297 \text{ cm} \simeq 3{,}30 \text{ cm}$$

Srednji fiktivni radijus otvora između šipki armature

$$S = a \cdot b/2(a+b)$$



Slika 6



Slika 7

Dugim ispitivanjima ustanovilo se da će beton sigurno prolaziti kroz mrežu armature ili ispuniti uske elemente ako je ispunjen uslov

$D/S < 1{,}4$ za zrna agregata s oblim ivicama

$D/S > 1{,}2$ za drobljenac oštrih bridova

Ako je dakle agregat šljunak, maksimalni promjer zrna smije biti 0,7 najmanjeg razmaka šipki armature, a ako je agregat drobljenac, onda D_{max} smije biti 0,6 razmaka armature. Isto je tako zapaženo da će beton dobro ispuniti armaturu i oplatu ako je srednji fiktivni radijus

$R = 1{,}45\ \rho$ za šljunak

$R = 1{,}25\ \rho$ za drobljenac

Maksimalna zrna trebala bi zadovoljiti uslov

$$0{,}8 < D/R < 1 \text{ ili } 1 < R/D < 1{,}25$$

U našem ranijem primjeru

$$D/R = \frac{3{,}0}{3{,}3} = 0{,}91 \quad \text{ili} \quad R/D = \frac{3{,}3}{3{,}0} = 1{,}10$$

Faury nadalje smatra da treba odrediti zakone granulacije sitnih i srednjih zrna od 0 do D/2 i onih od D/2 do D, gdje je D_{max} promjer najvećeg zrna.

Formula koju daje ovisi o promjeru najvećeg izabranog zrna, o obliku zrna, o načinu ugrađivanja i o efektu zida. Na apscisu se nanose vrijednosti proporcionalno sa $\sqrt[5]{d}$, gdje je d promjer odgovarajućeg sita. Na ordinatu se nanose procenti apsolutnog volumena materijala, uključujući i količinu cementa. Ordinatu u $D/2$ izračunamo prema danoj formuli

$$y_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{R/D - 0{,}75}$$

gdje je

A = koeficijent koji ovisi o načinu ugrađivanja i vrsti agregata, a njegove vrijednosti dane su u tablici.

D = promjer maksimalne veličine zrna u milimetrima.

B = koeficijent koji ovisi o jačini zbijanja. Za obično ugrađivanje $B = 1{,}5$, a za vrlo jako vibriranje $B = 1$.

R = srednji radijus u milimetrima za dijelove s najgušćom armaturom.

Vrijednosti za A

Tablica 12

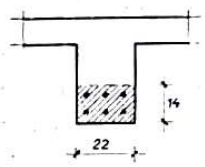
Konzistencija betona	Pijesak i šljunak zaobljenih stranica	Pijesak zaobljen i drobljenac	Pijesak i drobljenac oštrobridni
Konzistencija vlažna kao zemlja; zbijanje vrlo snažno vibriranje	16 ... 24	18 ... 26	20 ... 30
Konzistencija vrlo čvrsta do meka; zbijanje čvrsto do srednje. Lagano vibriranje ili probadanje betona u uskoj oplati i guste armature	24 ... 30	26 ... 32	30 ... 36
Žitka i vrlo žitka konzistencija bez ili sa slabim nabijanjem	30 ... 32 i više	32 ... 34 i više	36 ... 38 i više

Vrijednosti za $\sqrt[5]{D}$

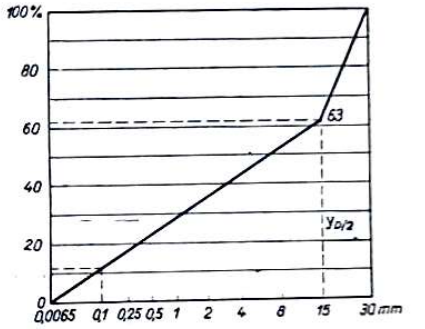
Tablica 13

D u mm	0,1	0,25	0,3	1	2	4	8	15	16	30	32	60	64
$\sqrt[5]{D}$	0,63	0,76	0,87	1	1,15	1,32	1,52	1,72	1,74	1,96	2	2,27	2,3

Kao primjer izračunat ću granulometrijsku liniju po Fauryju za neku armirano-betonsku gredu istih dimenzija kao u ranijem primjeru. Ranije izračunani $R = 3{,}30$ cm



Slika 8



Slika 9

Konzistencija betona između meke i čvrste, pa se vrijednost A, procjenjuje prema tablici

$$A = 27,\ B = 1$$

Vibriranje snažno. Vodocementni faktor izabran već ranije: $V/C = 0{,}5$. Ordinata u $D/2$ iznosi

$$y_{D/2} = 27 + 17 \cdot \sqrt[5]{30} + \frac{1}{1{,}10 - 0{,}75} = 27 + 33{,}32 + 2{,}86 = 63{,}18 \cong 63\%$$

Budući da u agregatu nemamo kamene prašine ispod 0,1 mm vidimo iz dobivene linije da zapremina cementa iznosi 12%, kao ordinata sita 0,1 mm. 1 m³ volumena čvrstog betona možemo uzeti da iznosi 990 l, jer unatoč čvrstom zbijanju ostat će oko 10 l šupljina.

Spec. težina cementa $\gamma_c = 3{,}1$ Mp/m³

Spec. težina agregata $\gamma_a = 2{,}6$ Mp/m³

Izračunat ćemo sada odgovarajuće količine cementa, agregata i vode

$$\frac{a}{2{,}6} : \frac{c}{3{,}1} = 0{,}88 : 0{,}12$$

$$\frac{c}{3{,}1} + \frac{a}{2{,}6} + 0{,}50\ c = 990$$

Rješenjem gornjih jednadžbi dobivamo

$$\frac{c}{3{,}1} = \frac{990}{9{,}88} \cong 100 \text{ l zapremine cementa}$$

$$C = 100 \cdot 3{,}1 = 310 \text{ kg cementa}$$

Količina vode $V = 0{,}50\ C = 155$ l

Količina agregata

990 — 100 — 155 = 735 l agregata, ili uz postavljenu težinu u prosjeku za sav agregat od 2,6 Mp/m³ potrebno je

$$735 \cdot 2{,}6 = 1\,901 \text{ kg agregata.}$$

U praksi se često susrećemo sa slučajem da nam rezultati pokusnih kocki daju lošije rezultate od kocki isječenih iz otvrdle mase betona. Tumačenje takvih anomalija svodilo se na cijeđenje vode kroz spojeve oplate, bolje nabijanje itd. Tu međutim igra vidnu ulogu efekt zida.

Za kalup pokusne kocke veličine stranice 20 cm srednji fiktivni radijus jest 20/5 = 4 cm, pa prema tome da se zadovolji uslov $0{,}8 < D/R > 1$ može maksimalna veličina zrna biti 4 do 4,5 cm. Ako u betonu koji upotrebljavamo u velikoj masi imademo zrna većih od 4 cm, u pokusnoj će kocki doći do djelovanja efekta zida i beton neće biti kompaktan, dakle dolazi i do manje čvrstoće.

Na kraju ovog poglavlja dajem još neka iskustva u vezi s granulacijom.

Granulometrijski sastav pijeska za izradu betona (američka iskustva)

Tablica 14

Veličina sita u mm	Individualni procent ostatka	
	Prirodni pijesak	Drobljeni pijesak
0,25	12 ... 20	10 ... 20
0,50	15 ... 35	10 ... 30
0,80	10 ... 30	10 ... 30
1,50	10 ... 20	10 ... 25
3,0	5 ... 20	10 ... 25
6,0	0 ... 5	0 ... 5
maks. MF	3,0	3,25
min. MF	2,5	2,50

MF označuje modul finoće koji dobijemo zbrajanjem ukupnih procenata ostataka na svakom situ, podijeljenih sa 100. On predstavlja mjerilo finoće ili krupnoće agregata.

Granulometrijski sastav krupnog agregata za izradu betona

Tablica 15

Veličina sita u mm	Individualni procent ostatka			
	maksimum			
	19 mm	38 mm	76 mm	152 mm
6	30 ... 50	20 ... 35	15 ... 20	8 ... 15
9,5	50 ... 70	30 ... 35	20 ... 25	12 ... 20
19	0 ... 5	40 ... 50	20 ... 35	20 ... 30
38		0 ... 5	20 ... 35	20 ... 30
76			0 ... 5	20 ... 30
152				0 ... 10

Općenito se može kazati da pravilna granulacija pijeska najviše utječe na čvrstoću betona. Krupan agregat manje utječe na čvrstoću betona, ali se štedi cement i potrebno je manje vode za miješanje. Najkritičnija zrnatost je 6...10 mm, jer ako ga ima previše u smjesi agregata beton je opor, teško ugradiv i ima tendenciju za segregacijom većeg zrnja.

Naša Uputstva za primjenu PTP za beton i armirani beton daju ove opće sugestije:

Sadržaj finog pijeska ispod 0,5 mm ne treba da iznosi više od 20% u odnosu na mješavinu pijeska krupnoće do 8 mm. U odnosu na mješavinu šljunka i pijeska zajedno, sadržaj finog pijeska ispod 0,5 mm ne treba da iznosi više od 8 do 10%. Zapreminski odnos pijeska prema šljunku treba da se kreće u granicama 1 : 2 do 1 : 1.

Ukoliko se agregat ne dobije već sortiran prema veličini zrna, treba sijanje izvršiti na samom gradilištu. Naravno da odvajanje agregata ne treba vršiti na kompletnoj seriji sita, već se to vrši na 2 do 4 sita, već prema važnosti radova. »Odvajanje agregata samo na dvije frakcije, na pijesak do 8 mm i šljunak preko 8 mm, treba kod većih radova uzeti kao minimalan zahtjev. Treba težiti da se agregat odvoji barem u tri frakcije.«

Faury preporučuje za kvalitetan beton bar tri frakcije i to: pijesak 0,1/0,4 s mnogo sitnih zrna iznad 0,1 mm; običan pijesak 0,4/6,3 i šljunak 6,3/25 mm.

Za krupne betone treba dodati i četvrtu frakciju najkrupnijih zrna 25/50...100 mm.

Za sastav krupne ispune od nekoliko frakcija za pomorske radove sovjetski propisi obavezno propisuju 2...4 frakcije, u zavisnosti od krupnoće agregata.

Broj frakcija u zavisnosti od krupnog agregata po GOST-u 4797—49

Tablica 16

Za najveći promjer zrna agregata u mm	Broj frakcija	Veličina zrna u mm
40	2	5 ... 20 i 20 ... 40
60	2	5 ... 20 i 20 ... 60
80	2	5 ... 40 i 40 ... 80
	3	5 ... 20, 20 ... 40 i 40 ... 80
150	3	5 ... 40, 40 ... 80 i 80 ... 150
150	4	5 ... 20, 20 ... 40, 40 ... 80 i 80 ... 150

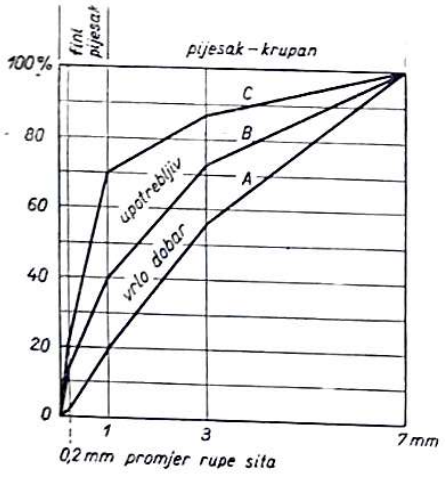
U ovom poglavlju iznio sam naše propise i citirao najvažnije što je potrebno znati da se može izraditi potrebna receptura za agregat na gradilištu. Dao sam još nekoliko tablica dobivenih iskustvom iz radova u laboratorijima i na gradilištima Sovjetskog Saveza, Amerike itd., što smatram da može vrlo dobro poslužiti inženjerima i tehničarima kao orijentacija u njihovu radu. Pomnijom usporedbom uočit ćete i stanovita manja protuslovlja u njihovim podacima. To ne smije zbunjivati, kao što ne trebaju zbunjivati ni mnoge granulometrijske linije priznatih autora koje nastoje dati recept za idealan beton, a također se djelomično razlikuju.

Na početku poglavlja govorio sam o razlozima zašto do danas još nemamo takove jedinstvene idealne linije.

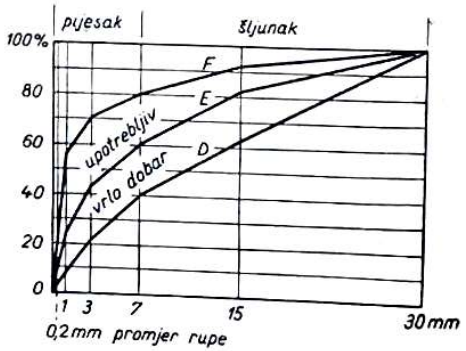
Svaki inženjer koji se bavi problemom granulacije treba granulaciju izabrati na osnovi učinjenih pokusa čiji mu rezultati daju beton najbolje kvalitete koju želi imati, a od agregata izabrati onaj koji mu stoji na raspolaganju, te raditi po odabranoj metodi ili postupku.

Budući se u kasnijim izlaganjima nekoliko puta pozivam na granulometrijsku *B* liniju pijeska prema propisima njemačkog Odbora za armirani beton DIN 1045, dajem linije prosijavanja za pijesak od 0 do 7 mm i ukupnog agregatnog materijala od 0 do 30 mm.

Sitnog pijeska treba da bude najmanje 20%, a najviše 70% u mješavini pijeska.



Slika 10. Linije prosijavanja za pijesak od 0 do 7 mm, prema DIN 1045



Slika 11. Linije prosijavanja agregatnog materijala od 0 do 30 mm, prema DIN 1045

U mješavini pijeska i šljunka ili drobljenca mora biti minimum pijeska 0...7 mm 40%, a maksimum 80%. Naročito dobrim smatra se onaj agregat čije krivulje prosijavanja prolaze između linija *A* i *B*, sl. 10, odnosno linija *D* i *E*, sl. 11.

Sastav zrnatosti pijeska prema linijama *A*, *B* i *C*

Tablica 17

Sito s rupicama mm	Ostatak na situ u %			Prolazi kroz sito u %		
	A	*B*	*C*	*A*	*B*	*C*
0,2	98	85	79	2	15	21
1	80	60	30	20	40	70
3	44	28	13	56	72	87
7	—	—	—	100	100	100

Pijesak prema krivulji *A* i *B* označen je kao vrlo dobar, a onaj prema *C* kao uporabljiv.

Što su sitnija zrna agregata veća je površina koju je potrebno oblijepiti cementnim tijestom, odnosno mortom. Da o tome steknemo jasniju predodžbu dajem prikaz koliko iznosi površina zrnaca kuglasta oblika u m² za 1 kg agregata

Promjer zrnaca u mm	Površina zrnaca u m²/kg
30	0,077
20	0,115
10	0,231
5	0,461
3	0,770
1	2,305
0,5	4,610
0,1	23,050
0,01	230,500

UPOTREBLJENA LITERATURA

J. Faury: *Le béton.*
R. F. Blanks i H. L. Kennedy: *Technology of Cement and Concrete.*
E. Probst: *Grundlagen des Beton und Eisenbetonbaues.*
E. Probst: *Handbuch der Betonsteinindustrie.*
A. Humel: *Das Beton — A B C.*
R. Grün: *So macht man guten Beton.*
I. A. Voronov: *Morskie sooruženiy iz betona i železobetona,* 1950.
V. Juranović: *Beton i armirani beton,* sv. 1.

SEPARACIJA KRUPNIJEG AGREGATA I PIJESKA NA GRADILIŠTU

Problematikom drobljenja i separiranja kamenog agregata neću se ovdje baviti, jer to ne pripada u djelokrug ove knjige. Želim samo upozoriti na jedno naše rješenje separacije koje je dobro, pa može prema potrebi koristiti.

Kako su baš pomorski radovi često većeg opsega, gdje se ugrađuju velike količine betona, pravilno granuliranog sastava agregata, pojavljuje se potreba izrade pogodne separacije na samom gradilištu, ili u njegovoj blizini.

Zavod za raziskavo materijala in konstrukcij NR Slovenije u Ljubljani pozabavio se tim pitanjem i dao svoj prijedlog vrlo uporabljive i ekonomične separacije. Dobivene rezultate publicirao je u svojim »Informacijama«, u broju 1. od januara 1962. g.

Budući da svu mašinsku opremu separacije proizvodi Strojna tovarna Trbovlje, što znači da svu opremu možemo nabaviti u zemlji, želio sam posebno istaći baš taj tip separacije. U svom izlaganju koristit ću samo podatke iz »Informacija« broj 1/1962, a za sve detaljnije podatke i nacrte neka se pojedina gradilišta obrate direktno pomenutom Zavodu. Kako sam već rekao, postoji mnogo takvih rješenja s domaćom i stranom opremom, te mnogo alternativa i specifičnih rješavanja. Projekti za separaciju agregata, takozvane Kombi separacije, izrađeni su za tipove malog, srednjeg i velikog kapaciteta. Prema proizvodnom kapacitetu postoje ovi tipovi:

Separacija tip	Učinak u m³/h
I a	10
I b	15
II a	20
II b	30
III a	40
III b	50

Osnovne varijante tehnološkog procesa su:

a) jednostepeno drobljenje agregata
b) dvostepeno drobljenje agregata
c) proizvodnja frakcija do maksimalne veličine zrna 15/30 mm
d) isto, do veličine zrna 30/60 mm
e) eliminiranje mikrofrakcija, tj. prašine ispod 0,1 mm, iz sitnog pijeska
f) frakcioniranje sitnog pijeska do 4 mm u dvije frakcije, s istovremenim izlučivanjem mikrofrakcija.

Spomenuti proces može se prema potrebi proširiti ili suziti.

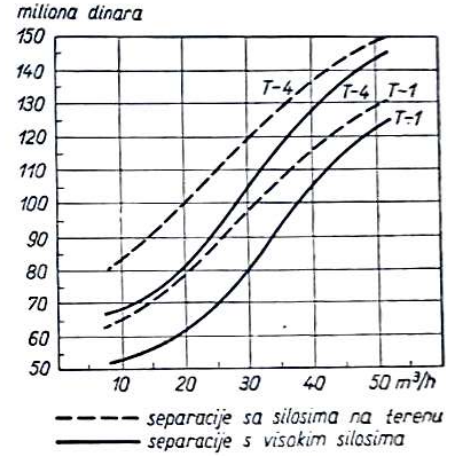
Separacija T — 1 s jednostepenim drobljenjem materijala, uz izlučivanje prašine. Proizvodi se prirodan, djelomično drobljen i opran agregat bez prašine. Proizvodni agregat podijeljen je u frakcije: 0, 1/4, 4/8, 8/15, 15/30 i eventualno, po potrebi, 30/60 mm.

Separacija T — 2 s dvostepenim drobljenjem i izlučivanjem prašine. Proizvode se iste frakcije i operacije kao kod T — 1, s većom količinom drobljena agregata. Ako u prirodnoj sirovini materijala ima previše grubih frakcija, a premalo sitnih, vrši se i drobljenje grubog agregata.

Separacija T — 3 s jednostepenim drobljenjem, te svim operacijama spomenutim kod T — 1. Frakcioniranje sitnog pijeska vrši se vodenim postupkom. Podijeljenost materijala u frakcije kao gore.

Separacija T — 4 s dvostepenim drobljenjem. Isto kao kod T — 3.

Silosi separacije mogu biti terenski ili visoki, a pražnjenje silosa podešeno je prema terenu, pa se materijal može odvoziti vagonetima, kamionima ili transportnom trakom.



Slika 12. Troškovi u milionima dinara prema cijenama iz 1962. god. za postavljanje separacija različitog kapaciteta (objekti, mašinska oprema i instalacije)

Koji će tip separacije odgovarati u pojedinom slučaju odlučit će potrebe i uslovi jednog ili više gradilišta. Ovakve separacije mogu opskrbljivati jedno veliko gradilište ili, još bolje, ako su sagrađene na povoljnom mjestu bogatu dobrom sirovinom, mogu se organizirati za opskrbu čitavog jednog područja.

Ovaj kratki izvadak iz »Informacija« unosim u ovu knjigu da velikim radilištima posluži kao orijentacija kolike su investicije, i da vide kako u principu treba pristupiti tom problemu. Nadalje želim popularizirati rad koji je kod nas na tom polju već učinjen, da se svaki put ne polazi iznova, već da se koriste stečena iskustva.

ALKALNO-AGREGATNA REAKCIJA BETONA

Davno je opaženo da su kod nekih betona nastajale pukotine kojima se nije znao pravi uzrok. Tek prije dvadesetak godina Stanton je počeo stručno ispitivati te pojave i dokazao je da alkalije portland-cementa reagiraju s nekim silikatnim sastojinama iz agregata, uslijed čega dolazi do razaranja betona. Unatoč toj spoznaji teškoća je bila u tome što se opazilo da svaki cement pomiješan s agregatom koji sadrži silikate ne izaziva alkalno-agregatnu reakciju. Ni danas se ta pojava još nije potpuno rasvijetlila, iako je učinjeno već mnogo, i zna se koji uzroci dovode do te reakcije i pospješuju je, pa se može već unaprijed nastojati spriječiti tu pojavu.

Kao prvo opazilo se da do alkalno-agregatne reakcije dolazi najčešće onda ako je upotrijebljen cement bogat alkalijama. Prema tome u slučajevima kad postoji sumnja da može doći do alkalno-agregatne reakcije treba upotrijebiti niskoalkalne cemente, a to su oni koji sadrže maksimum 0,6% alkalija izraženih kao ekvivalent Na_2O.

U takvim cementima treba dakle smanjiti sadržaj trikalcijskog aluminata i tetrakalcijskog aluminoferita. Time se istodobno povećava sadržaj trikalcijskog i bikalcijskog silikata. Već sama ova mjera često pomaže, ali ne uvijek. Pokazalo se da je došlo do pucanja nekih betona koji su se nalazili u vlažnoj sredini kod temperature od 20 do 50 °C, unatoč upotrebi cementa ukupnog sadržaja alkalija od 0,4%.

Ustanovilo se da je vrlo korisna upotreba portland-pucolanskih cemenata, jer pucolan apsorbira alkalije i, vežući se s njima kemijski prije nego što dođe do reakcije sa silikatima agregata, onemogućuju tzv. alkalnu reakciju agregata.

Interesantno je napomenuti da neki vrlo reaktivni agregati kada se fino samelju i pomiješaju s cementom djeluju kao pucolani i ne dovode do ekspanzije u betonu. Ovo saznanje još je jedan od poticaja da se za hidrotehničke radove upotrebljava pucolanski cement, a ne čisti portland.

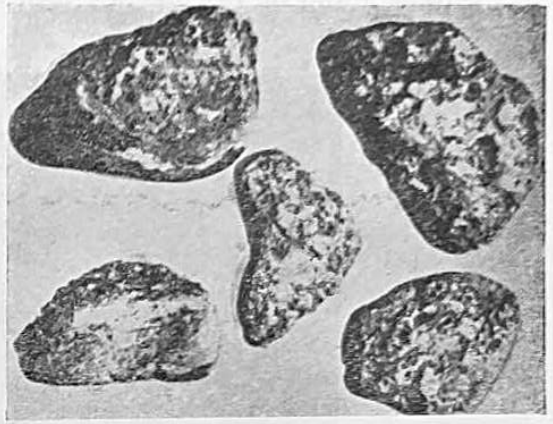
Već sam napomenuo da je u vlažnoj sredini u betonu sačinjenom sa slabo alkalnim cementom ipak došlo do reakcije alkalija s agregatom. Uvidjelo se dakle da je za tu reakciju potrebno i prisustvo vode. Budući da se kod miješanja betona dodaje daleko više vode nego što je treba za proces hidratacije, ostaje još dovoljno vode i za alkalnu reakciju.

Ako je beton u vlažnoj sredini, suvišna voda u njemu ostaje mnogo duže, pa je i mogućnost razvoja alkalne reakcije vjerojatnija

Naravno, ako se želi izbjeći toj neugodnoj reakciji koja dovodi do pucanja betona, smanjenja čvrstoće i elastičnosti, te smanjenja otpornosti na smrzavanje, a time i trajnosti, treba se kod izbora agregata odlučiti za nereaktivan agregat.

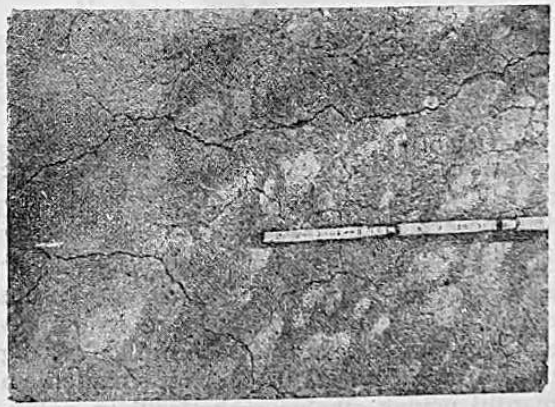
Kao jače reaktivni sastojci u agregatu pokazali su se minerali opal (čert), zatim stijene kao filit, te neutralne i kisele vulkanske stijene andezit i riolit, dok su slabije reaktivni kalcedoni i mnogi silikatni vapnenci.

Reakcija alkalija i agregata izgleda da se odvija na ovaj način: Zbog jake rastvorljivosti alkalija već nekoliko sati nakon miješanja betona voda preuzima znatne količine alkalija. Prema tome koncentracija alkalija naglo raste, a kalcijski silikati i aluminati hidratiziraju, i tako nastaju kaustični rastvori s visokoalkalnim cementom. Ovaj kaustični rastvor djeluje na čestice agregata, te dolazi do stvaranja alkalno-silikatnog gela.



Slika 13. Zrna šljunka djelimično obložena reaktivnim opalom

Ovako nastupajuća reakcija alkalija i agregata uzrokuje ekspanziju i pucanje betona, što nastaje uslijed stvaranja velikih pritisaka u betonu. Te naprsline, koje mogu doseći i širinu od 40 mm, ne šire se duboko u masu betona, već se nakon nekoliko centimetara granaju u pukotine kapilarnih veličina. Ove pukotine pune se alkalno-silikatnim gelom, koji izlazi na površinu kao bijel amorfan talog, ili kao bezbojan vodenast gel, kemijskog sastava natrijevog i kalijevog silikata. Ekspanzija betona nastala uslijed takve reakcije alkalija i agregata može biti linearno i veća od 0,5%.

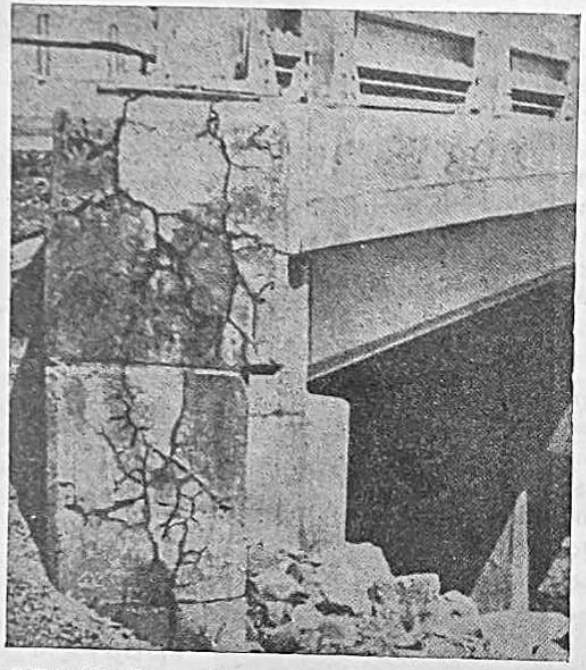


Slika 14. Tipična slika površinskih pukotina betona uslijed ekspanzivne alkalno-agregatne reakcije

Interesantno je da je pokusima ustanovljeno kako pojedine vrste minerala dovode do maksimalne reakcije kod stanovitog procenta reaktivnog minerala u ukupnoj količini agregata. Maksimalna ekspanzija javlja se ako je dodatak opala 2...5%, dok za andezit, već prema vrsti, kod 20...50%.

Daljnji su pokusi pokazali da je pucanje betona rezultat mehaničkih sila koje su nastale uslijed fizikalno-kemijskih reakcija. Kako se te reakcije manifestiraju kao mehaničke sile danas se još sa sigurnošću ne može ustanoviti. Ipak izgleda da do propadanja betona dolazi zbog osmotskog pritiska koji nastaje u stvorenom gelu; taj pritisak je izmjeren i doseže do 30

atm. Ovakvo tumačenje nastajanja osmotskog pritiska objašnjava još jednu pojavu. Ako je agregat porozan i šupljikav, opazilo se da je propadanje betona uslijed alkalno-agregatne reakcije smanjeno ili potpuno spriječeno. To se tumači time što šupljine i pore u malteru ili agregatu pružaju stvorenom gelu prostor u koji on ekspandira i tako se smanjuje pritisak koji razara beton.



Slika 15. Upornjak mosta uništen uslijed alkalno-agregatne reakcije

Na kraju bih želio još napomenuti da povećane temperature i veće količine cementa u smjesi betona također pojačavaju alkalno-agregatnu reakciju i njene neugodne posljedice. Veće količine cementa u smjesi povećavaju i količinu otopljenih alkalija, pa se time tumače i jače alkalne reakcije.

Često je nužno, unatoč petrografskim pretragama izabranog agregata i ustanovljenju njegove znatnije reaktivnosti, upotrijebiti ga za izradu betona, iz ekonomskih razloga. U tom se slučaju mora upotrebom pucolanskog cementa, upotrebom sredstava za stvaranje šupljina u malteru, smanjenjem visine vlažnosti i temperature smanjiti učinak alkalne reakcije ili ga potpuno otkloniti, što će se utvrditi prethodno izvršenim pokusima.

UPOTREBLJENA LITERATURA

R. F. Blanke i H. L. Kennedy: The Technology of Cement and Concrete.

Parson Insley *Aggregate Reaction with Cement Alkalies*, ACI Proc. Vol. 44, 1948.

Mc Connell, Mielenz, Holland, Greene: *Cement-aggregate Reaction in Concrete*. ACI Proc. Vol. 44, 1947.

PLASTIFIKATORI I OSTALI DODACI

Poznato je da su već stari narodi Istoka, a kasnije i Rimljani, izrađivali beton na bazi različitih hidrauličkih veziva poznatih u ono vrijeme, te im često dodavali krv, mlijeko itd. Oni tada nisu znali za plastifikatore, ali su naučili da tim dodacima beton postaje bolji i obradljiviji.

Početak je vjerojatno potekao od vjerskih obreda i pridonošenja žrtava, a kasnije ih je praksa naučila da ti dodaci poboljšavaju kvalitetu njihovih betona.

Danas znamo da je hemoglobin jak plastifikator i aerans, koji pridonosi boljoj ugradivosti. Kasnije se takvim dodacima nije pridavala veća važnost, a naročito od vremena pronalaska portland-cementa. Dugo se odbacivala ideja dodavanja cementu bilo kakvih preparata.

Posljednjih 50 godina počeo je jak razvoj plastifikatora na bazi različitog djelovanja, te su se počeli primjenjivati u mnogim zemljama Evrope i Amerike. No još uvijek se na njihovu primjenu gledalo sa skepsom i nazivalo ih se »otrovom za cement«.

Naučnim ispitivanjima u laboratorijama i stečenim iskustvima u praksi mnogi od plastifikatora i aeransa dobili su svoju stručnu potvrdu, pa se npr. danas u USA oko 90% betona izrađuje sa spomenutim dodacima i primjesama.

Evropa i SSSR poslije drugog svjetskog rata naročito za hidrotehnički beton mnogo upotrebljavaju i preporučuju plastifikatore i aeranse radi mnogih poboljšanja važnih svojstava betona. Kod nas se plastifikatori još uvijek malo upotrebljavaju, vjerojatno zbog toga što se većina tih preparata mora još i danas kupovati u inostranstvu.

Prema zahtjevima i svrsi, te prema osobinama i djelovanju primjesa i dodataka, možemo ih podijeliti u više većih skupina, koje se opet mogu raščlaniti u niz podgrupa.

Glavne skupine bile bi:

plastifikatori ili močila, odnosno maziva,
akceleratori ili ubrzivači,
retardatori ili usporivači,
pucolanski materijali itd.

Skupinu plastifikatora možemo dalje podijeliti ovako:

1) Sredstva kao što su bentonit, lebdeći pepeo, pucolani, ilovača u prahu itd.

U ovu bi grupu išlo i vapno, ali ono za podmorski beton nije preporučljivo.

2) Agensi za disperziju ili raspršivanje.
3) Agensi za denzifikaciju ili zgušnjavanje.
4) Agensi za aeriranje ili uvlačenje uzduha.

Prije prelaza na djelovanje pojedinih plastifikatora potrebno je spomenuti da jedni od njih imaju samo fizikalna svojstva, drugi samo kemijska, a ima ih čija su svojstva fizikalno-kemijska. Plastifikatore koji djeluju svojim fizikalnim svojstvima, tj. oblikom čestica, zovemo *maziva*. Sitne sferične čestice ispunjaju prostore između zrnaca i čestica u betonu, koji su inače ispunjeni vodom ili uzduhom, te radi svojeg oblika smanjuju trenje među česticama i omogućuju djelomično eliminiranje vode.

Među plastifikatore-maziva ubrajamo uglavnom sve prirodne plastifikatore iako kod nekih ne dolazi samo do fizikalnih, već i fizikalno-kemijskih djelovanja.

Bentonit je zemljani materijal vrlo fine listićaste strukture s visokim sadržajem kremične kiseline. Sličan je kaolinu, kemijskog sastava $Al_2[(OH)_2Si_4O_{10}] \cdot nH_2O$. Apsorbirajući vodu stvara gel i jako buja, te povećava svoj volumen za 10...15 puta, čime pridonosi povećanju nepropusnosti betona. Dodatkom bentonita povećava se ugradljivost, nepropusnost i otpornost protiv smrzavanja, ali se ne smanjuje vodocementni faktor. Bentonita se dodaje 1...5% od težine cementa. Nalazišta bentonita odlične kvalitete imademo kod Petrovca, nešto južnije od Budve. Dodavanjem fino mljevenog pucolana također povećavamo obradivost, radi stvaranja ljepljivog gela.

U novije vrijeme se više kao mazivo upotrebljava i lebdeći pepeo, ali odgovara samo onaj kojeg je sadržaj ugljena ispod 6%. Pojedine čestice lebdećeg pepela pod mikroskopom su sferična oblika, a u mješavini betona djeluju kao neki kuglični ležajevi, te masa postaje žitkija. Ukoliko bi pepeo sadržavao veći procent ugljena, potrebno bi bilo dodavati više vode za istu konzistenciju.

Aktivni pucolan i lebdeći pepeo kod podmorskog betona ne samo da djeluju kao plastifikatori, već ujedno i vežu slobodno vapno, čime povećavaju otpornost betona. Na početku hidratacije dolazi do flokulacije čestica cementa, naročito veličine ispod 0,2 mikrona. Flokulacija nastaje zbog međusobnog privlačenja čestica cementa, koje drže na okupu molekularne sile. Čestice se gomilaju u grumene ili grozdove, koji su u nutrinji ispunjeni vodom i zrakom.

Kemijski preparati, djelovanje kojih se najvećma sastoji u razbijanju tih grozdova od čestica cementa, zovemo *močila*. Djelovanje močila sastoji se dakle u tome da eliminiraju vodu i zrak koji se nalaze između pojedinih kolonija čestica cementa i da tako dođe do deflokulacije i disperzije.

Dodavanjem dispergenta smanjuje se privlačnost između čestica cementa i dolazi do brže hidratacije tih čestica. Što dodajemo više dispergenta povećat će se i vlažnost, odnosno žitkost mješavine, pa možemo smanjiti dodatnu vodu, a da zadržimo traženu konzistenciju betona. Odgovarajuće smanjenje vode, a da ne mijenjamo konzistenciju betona, iznosi oko 25... 30 l/m³.

Agensi za dispergiranje podmazuju čestice cementa, a ne agregata, dok agensi za aeriranje djeluju obrnuto.

Močila ovakvog djelovanja su dispergenti, a obično su soli ligninsulfonske i naftalinsulfonske kiseline.

U Americi se danas mnogo upotrebljava dispergent Pozzolith. Svi dispergenti su plastifikatori koji smanjuju količinu vode potrebne u mješavini. Postoje agensi koji nisu dispergenti, a ipak imaju svojstvo da smanjuju potrebnu vodu. Takav agens je npr. Plastiment,* koji se upotrebljava u Evropi i Americi, a izrađen je na bazi kalcijeva lignosulfonata. On pripada grupi denzifikatora, a povećava fluidnost betona. On smanjuje količinu dodatne vode i time povećava čvrstoće betona, a osim toga usporava vezanje, pa se upotrebljava tamo gdje je to poželjno.

Na svjetskom tržištu imade danas mnoštvo plastifikatora s bezbroj imena, boljih i lošijih kvaliteta, ali princip njihova djelovanja može se uglavnom uvijek svrstati u jednu od spomenutih grupa plastifikatora.

Pri odluci o upotrebi nekog plastifikatora svakako je potrebno izvršiti ispitivanja kako reagira cement s kojim radimo na gradilištu, te kakve su reakcije kod određenih smjesa. Nije uvijek ista i povoljna reakcija ako u smjesi betona imamo 250 ili 450 kg cementa.

Budući da su kod podmorskog betona vrlo važni uslovi nepropusnost, manja količina dodane vode, veća obradivost itd., ne treba a priori odbacivati primjenu plastifikatora, koji se danas u svijetu sve više primjenjuje, naročito kod hidrotehničkih radova. Pri upotrebi plastifikatora s kojim želimo povećati nepropusnost betona moram upozoriti na jedno opće pravilo. Dodavanjem plastifikatora povećavamo obradivost, smanjujemo dodatak vode, povećavamo nepropusnost itd., no ako nam je beton radi lošeg granulometrijskog sastava porozan i propustan neće dodatak plastifikatora stvoriti gust i nepropustan beton.

Agensi za uvlačenje uzduha ili aeriranje smatram vrlo važnim i korisnim sredstvima koja se sve više upotrebljavaju, pa sam se s njima pozabavio u posebnom poglavlju.

Dodaci koje ne možemo često ubrojiti u plastifikatore, a u betonu vrše stanovito djelovanje, jesu akceleratori i usporivači.

Akceleratorima se mogu nazvati agensi koji u ranom periodu stvrdnjavanja betona povećavaju njegove čvrstoće.

Najstariji i najuobičajniji akcelerator je kalcijev klorid $CaCl_2$. Najčešća dozacija je 1...2% od težine portland-cementa, no već i dodatak od 0,2% daje vidne poraste čvrstoće betona u prvih 7 dana. Upozoravam ponovo da vezanje i stvrdnjavanje nije isto. Kalcijev klorid ubrzava stvrdnjavanje, dok na vezanje vrlo malo utječe. Za ubrzavanje vezanja najčešće se upotrebljavaju alkalijevi silikati ili aluminati.

Dodamo li portland-cementu 2% $CaCl_2$ on će se stvrdnuti u roku od 7 dana, kao čisti cement bez dodatka za 28 dana.

Kalcijev klorid pokazuje dobre rezultate stvrdnjavanja za portland i metalurški cement, dok se za aluminozni cement ne može upotrijebiti jer mu smanjuje čvrstoću.

Osim kalcijeva klorida upotrebljavaju se kao akceleratori i natrijev ili kalcijev sulfat, natrijev ili kalijev klorid, natrijev karbonat itd.

Djelovanje ovih soli kao akceleratora slično je djelovanju $CaCl_2$, ali s manjom upotrebljenom energijom. Da bismo npr. postigli isti efekt ubrzanja stvrdnjavanja kao uz dodatak 2% $CaCl_2$, trebamo dodati 3% NaCl.

---

* Plastiment GMBH, Karlsruhe, Postfach 200.

Upotreba natrijeva ili kalijeva klorida te natrijeva sulfata kao dodataka cementu kod radova na suhu nisu preporučljivi, jer mogu izazvati raspadanje betona. Skupljanje betona uz ove je akceleratore manje nego uz dodatak $CaCl_2$, što je i razumljivo ako znamo da je kod njih razvijanje energije manje nego kod $CaCl_2$.

U SSSR-u se dosta često upotrebljava NaCl kao dodatak cementu, kako bi se snizila tačka smrzavanja i moglo betonirati ako naglo naiđe smrzavica. Dodavanje NaCl išlo je i do 10% od težine cementa, a da beton nije pokazao kasnija oštećenja. U normalnim slučajevima, kada se NaCl upotrebljava kao akcelerator, ne bi trebalo ići preko 3% dodatka.

Prema američkim pokusima gubitak čvrstoće betona iznosi:

uz dodatak NaCl od 1% za 7%
uz dodatak NaCl od 2% za 15%
uz dodatak NaCl od 5% za 28%
uz dodatak NaCl od 10% za 34%
uz dodatak NaCl od 20% za 40%

Nedostatak dodavanja natrijeva klorida je što se time smanjuju čvrstoće betona i što beton postaje higroskopan.

Sadrovac ili kalcijev sulfat sa dvije molekule vode uporabljiv je akcelerator za cemente bogate zgurom visokih peći ili za pucolanske cemente, gdje je kao pucolan upotrijebljen lebdeći pepeo. Interesantno je da se sadra dodaje portland-cementu još kod produkcije, da bi djelovala kao usporivač, a ne akcelerator.

Dodajemo li natrijev karbonat mješavini betona radi ubrzanja vezanja smanjit će se topljivost vapna. Od ranije znamo da možemo 1,3 g vapna rastvoriti u 1 litri čiste vode. Rastopimo li u 1 litri vode 2 g natrijeva karbonata rastvorljivost za vapno neće biti veća od 0,5 g/l, a ako je u rastvoru 8 g Na_2CO_3, onda je rastvorljivost vapna samo 0,11 g/l.

Kalcijev aluminat djeluje kao akcelerator vezanja na portland-cement, ali ne na pucolanske cemente ni na cemente zgure.

Ima produkata koji djeluju kao ubrzivači vezanja, a u isto vrijeme i kao usporivači stvrdnjavanja, pa su ili ubrzivači ili usporivači vezanja, a da pri tome uopće ne djeluju na proces stvrdnjavanja.

Osim soli akceleratora postoje i klice kristalizacije koje uvećavaju čvrstoće betona, naročito one kasnije. Klice kristalizacije ne pospješuju vezanje niti utječu na skupljanje. One se mogu kombinirati sa solima akceleratora najčešće s kalcijevim kloridom, jer kako vidimo njihova se svojstva nadopunjuju, pa tako dobivamo izvrsne akceleratore. Klice kristalizacije obično su klice hidratnog cementa još jednom mljevene do finoće cementa ili još finije.

Dodatkom klica kristalizacije povećava se broj potpuno hidratiziranih čestica cementa i progresivno stvaranje novih mikrokristala, što sve pridonosi povećanjima čvrstoće betona.

Usporivači su agensi koji, obratno od akceleratora, usporuju vrijeme vezanja cementa. Ranije se ukazivala vrlo mala potreba za usporivačima, no danas, razvojem tehnike a naročito primjenom revibracije, počelo se sve više upotrebljavati usporivače.

Najpoznatiji i najrašireniji klasični usporivač početnog vezanja je kalcijev sulfat ili sadra, koji se dodaje portland-cementu već kod fabrikacije. O njegovu djelovanju i količini dodavanja govorio sam u poglavlju o fabrikaciji portland-cementa.

Sadru ne možemo dodavati po volji da se pojača usporavanje, iz dva razloga: prvo radi stvaranja opasne Candlotove soli, a drugo što je sadra slabo topljiva, svega 2 g/l, pa nastaju poteškoće s njenim rastvaranjem.

Malo je usporivača koji vidljivo djeluju na početno vezanje cementa, a da ujedno ne oslabljuju kasnije stvrdnjavanje.

Ima produkata koji do stanovitog procenta dodavanja djeluju kao usporivači, ali pri povećanom dodavanju djeluju kao ubrzivači. Takovi su spojevi natrijev silikat i karbonat, kalcijev bromid itd. Uz dodatak od 2% djeluju kao usporivači, a kod dodavanja od 5% i više od težine cementa poprimaju osobine ubrzivača.

Šećer je također usporivač, ali u prejakom dodatku može vezanje biti potpuno prekinuto, pa se beton uopće ne stvrdne.

Šećer već osjetljivo reagira kao usporivač ako ga dodajemo u količini od 0,1 g na svaki kg cementa. Vrlo male količine šećera usporavaju pravilan tok vezanja i stvrdnjavanja, ali treba postupati vrlo oprezno, uz vršenje prethodnih pokusa, jer reagiranje ovisi o vrsti cementa, finoći mliva, količini cementa u smjesi itd. Malo veći dodaci šećera osjetno umanjuju konačne čvrstoće betona. Dodatak šećera može izazvati i lažno vezanje; cementno se tijesto skruti odmah nakon miješanja, a da do pravog stvrdnjavanja uopće ne dolazi.

Karakteristike usporivača slične šećeru ima i oksid cinka te humusna kiselina, pa je njihova upotreba preporučljiva uz najveći oprez i dobro poznavanje.

Dodatak od 3% tutkala vodi za miješanje znatno usporava vezanje, povećava nepropusnost i habanje, ali smanjuje vlačnu čvrstoću betona. Tlačne čvrstoće ostaju iste, ili su neznatno povećane.

Aluminijev klorid vrlo je blag usporivač, koji različito reagira s različitim vrstama portland-cementa.

Kalcijev lignosulfat pokazao se kao usporivač i plastifikator, a dodaje se 1...3% od težine cementa. Djelovanje tog usporivača to je bolje, što cement sadrži više C_3S.

Kao što je sadra usporivač portland-cementa, tako je usporivač za cemente s dodatkom zgure natrijev klorid.

Kalcijev nitrat ne valja dodavati aluminoznom cementu.

Iz ovog dosadanjeg nabrajanja kemijskih spojeva usporivača teško bi se izvođač mogao snaći i odlučiti kojega da izabere kod betoniranja. Svaki ima uz svoje dobre strane i loših osobina. Zato je najsigurnije i najbolje upotrijebiti prokušane usporivače koje dobijemo u trgovini. Takve usporivače možemo izabrati prema trajanju usporenja vezanja i ostalim karakteristikama.

Danas se mogu dobiti preparati usporivača koji usporavaju vezanje kroz 2 do 3 dana, a da pri tome nisu smanjene čvrstoće betona od 7 i 28 dana. To je vrlo važno, jer njihovom upotrebom ne produžuje se rok skidanja oplate i normalnog toka gradnje. Ako je vezanje produženo samo na 24...30 h, normalno stvrdnjavanje postiže se već nakon 2...3 dana.

Uz gotove preparate dobivamo tačne podatke o doziranju, o produženom roku vezanja, utjecaju na vlačne i tlačne čvrstoće itd.

Najbolje je postaviti producentima zahtjeve, a oni neka uz garanciju preporučuju prokušane preparate, uz davanje svih potrebnih podataka o upotrebi. No unatoč dobivanju takvih podataka poželjno je prije upotrebe izvršiti kontrolna laboratorijska ispitivanja, da budemo sigurni da ćemo te rezultate postići sa cementom s kojim ćemo raditi na gradilištu.

Korist od upotrebe usporivača očituje se kod masovnog betoniranja, naročito za vrijeme vrućih ljetnih dana, jer usporavanjem vezanja smanjuje se i nagao razvitak egzotermičkih reakcija, a time i prevelik porast temperature betona.

Usporeno vezanje koristi se i kod vezanja ranije mase betona s novom, koja je dodana u razdoblju dok još donji sloj nije vezao. Tako dobivamo blok betona koji nije razdijeljen u slojeve, što je vrlo važno za hidrotehničke objekte.

Nadalje smo vidjeli vrlo koristan utjecaj usporivača kod revibriranja betona, gdje oni igraju vrlo važnu ulogu i gdje ih treba svakako upotrebljavati.

Plastifikator i usporivač u blagoj formi jest npr. Plastiment, koji se u Evropi i Americi vrlo mnogo i s uspjehom upotrebljava.

Ako usporivač ima plastifikatorska svojstva povoljno djeluje pri betoniranju kontraktorom pod vodom, jer masa betona lakše teče kroz cijev.

To dolazi u obzir ako radimo s portland-cementnim betonom. Ako betoniramo s pucolanskim cementom nisu potrebni dodaci usporivača, jer sam pucolan djeluje usporenjem vezanja, a i kao dobro mazivo koje povećava obradivost betona.

UPOTREBLJENA LITERATURA

M. Duriez: *Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments.* Travaux, br. 3...7, 1953.

M. Duriez: *Quelques développements sur les ciments actuels et les agrégats, en vue de la réalisation de mortiers et de bétons, repondant aux exigences modernes.* Travaux, oktobar, 1961.

A. Humel: *Das Beton — A B C.*

R. F. Blanks i H. L. Kennedy: *The Tehnology of The Cement and Concrete.* New York, 1955.

L. Forsen: *The Chemistry of Retarders and Accelerators.*

E. Berger: *Calcium Sulphate Retarders for Portland Cement.*

V. V. Kind: *Korozija cemenata i betona u hidrotehničkim objektima.*

E. Probst: *Handbuch der Betonsteinindustrie.*

V. Juranović: *Beton i armirani beton,* svezak I.

AERIRANI BETON

U posljednjih 20 godina upotreba aeriranog betona u građevinarstvu postaje sve veća i raširenija, iako u nas još malo primjenjivana. Aerirani beton, ili beton s uvučenim uzduhom dobivamo ako ga pripremimo s cementom kome je dodan neki od agensa za aeriranje.

Takvi agensi najčešće su soli masnih kiselina, drvene smole itd., a u prodaju dolaze pod različitim imenima, kao Vinzol, Darex, le Fro B, Plastocrete, Barra itd. U Americi se mogu nabaviti već gotovi tipovi aeriranog cementa.

Agensi za aeriranje dodaju se u dopuštenom procentu klinkeru cementa prije mljevenja, ili se dodaju naknadno prilikom miješanja kao prašak ili emulzija.

Vinzol je npr. produkt prerade jelove smole, a dodaje se 0,05...0,5%, Darex AEA dodaje se 0,75...1,5%, dok Palstocrete 1% od težine cementa.

Pod imenom Darex prodaju se u raznim zemljama aeransi različite produkcije. Amerikanci ga prodaju pod imenom Darex, dok se u Italiji proizvodi pod imenima Darex AEA, Darex ARDA itd. Ostali aeransi dodaju se 0,01...0,03 već prema karakteristikama pojedinog aeransa.

Miješanjem s betonom Vinzol stvara pjenu koja apsorbira uzduh, čime beton dobiva poroznu strukturu, postaje plastičniji i ugradljiviji, pa mu se može smanjiti dodatak vode.

Aerirani betoni uz normalne uslove treba da imaju uvučenog uzduha 3...5% od ukupnog volumena betona, dok pod nepovoljnim uslovima količina uvučena uzduha može biti veća ili manja.

Budući da je doziranje agensa vrlo osjetljivo, a količina uvučena uzduha ovisi o pripremi, smjesi itd., pozabavit ćemo se kasnije detaljnije tom problematikom, jer prednosti koje pruža aerirani beton takove su da sve više prodire na tržište i u građevinarstvo u Americi, SSSR-u i zapadnoj Evropi.

U normalnom svježem betonu količina uzduha iznosi 1...3%, a u dobro nabijenom betonu iznosi oko 1,5%. Međutim znatna je razlika između ovog uzduha i onog koji uvlačimo aeriranjem.

U normalnom betonu uzduh se sakuplja u većim ili manjim šupljinicama i porama, pa što ih ima više, beton je propusniji. Kod aeriranog betona taj sakupljeni uzduh pretvara se u mnoštvo najsitnijih mjehurića kuglasta oblika, sasvim je drugog djelovanja, uslijed čega beton dobiva i druge karakteristike. U 1 m³ aeriranog betona nastaje oko 50×10^{10} takvih mjehurića uzduha.

Aerirani betoni uveliko poboljšavaju obradivost, trajnost i otpornost betona, a naročito otpornost prema smrzavanju i otkravljivanju. Otpornost protiv smrzavanja povećava se za 300...400%, a povećava se i otpornost protiv razornog djelovanja sulfata, što je interesantno za radove u moru. Beton s uvučenim uzduhom vrlo se malo »znoji«, a često je ta pojava i potpuno otklonjena. Ova neugodna pojava u uskoj je vezi sa segregacijom betona, što znači da aeransi pridonose kompaktnosti i nepropusnosti betona.

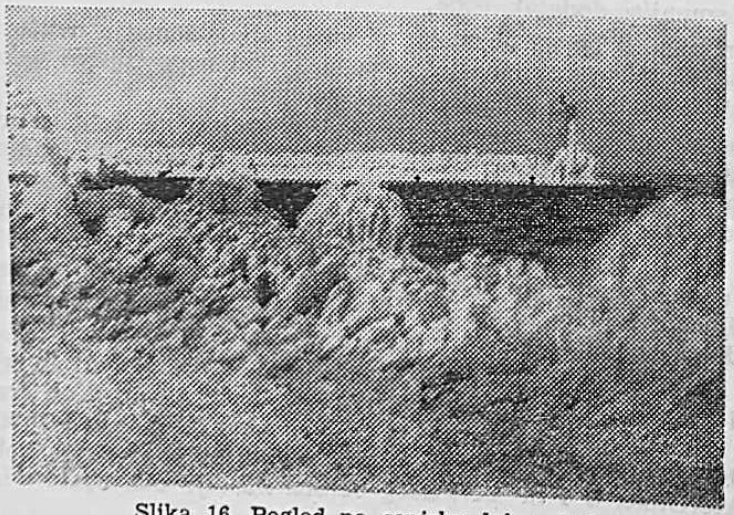
Pod pojmom »znojenja betona« razumijevamo izdizanje vode na površinu betona, kada beton neko vrijeme miruje nakon ugradbe. Do toga dolazi uslijed gravitacionog slijeganja agregata koji je teži od vode, a rezultat toga je manja jednolikost, čvrstoća i trajnost betona.

Ti betoni međutim gube na čvrstoći i to u ovisnosti o količini uvučena uzduha. Ako zadržimo isti vodocementni faktor općenito se na osnovi velikog broja pokusa može uzeti da je gubitak na čvrstoći 14 kp/cm² za svaki procent uvučena uzduha. Korišćenjem svojstva aeriranog betona da je plastičniji i ugradljiviji od betona istog sastava samo izrađenog s običnim portland-cementom, možemo aerirani beton miješati sa smanjenom količinom vode, dakle manjim V/C faktorom, čime se povisuje čvrstoća betona, dakle smanjuje i gore spomenuti gubitak čvrstoće.

Općenito možemo kazati da se dodatkom aeransa pri istoj ugradljivosti betona može smanjiti količina potrebne vode za oko 10 do 25 litara na m³ gotova betona.

Količina smanjenja vode ili vodocementnog faktora ovisi o vrsti i obliku zrna agregata, granulometrijskom sastavu itd. Pravu mjeru smanjenja dodatka vode najbolje se određuje pokusima na gradilištu.

Ako razmotrimo sve dobre i loše osobine aeriranog betona možemo doći do ovog zaključka: aerirani beton može se upotrijebiti i za armiranobetonske konstrukcije, ali svakako pad čvrstoće od oko 60...80 kp/cm² igra važnu ulogu u vezi s ekonomičnošću takvih konstrukcija. Kod masivnih objekata u moru i iznad mora, kao što su obalni zidovi, valobrani itd., čvrstoća betona ne igra takovu ulogu, a mnogo su važnije baš one osobine koje aerirani beton znatno poboljšava, kao što su obradivost, otpornost prema smrzavanju i sulfatima, te smanjenje segregacije, čime se opet povećava trajnost objekta.



Slika 16. Pogled na senjsku luku zimi

Slika 16 prikazuje senjsku luku zimi, za vrijeme puhanja hladne bure. Ta slika ponavlja se svake zime nekoliko puta. Štetno djelovanje smrzavanja svih nadmorskih dijelova obala može se vidjeti na betonu svakog proljeća. Oštećena mjesta napada morska voda nošena jugom i razaranje tih dijelova vrlo je ubrzano, a trajnost smanjena.

Na ovo sam upozorio, jer se često smatra da se u Primorju ne treba osvrtati na smrzavanje, i da ono ne igra nikakvu ulogu kod pomorskih objekata, iako stanje kao što je ovo na slici često vidimo na mnogim objektima sjevernog Jadrana zimi.

Često se gustoća i jedinična težina zamjenjuju i smatraju se sinonimima. Kod aeriranog betona nije tako. Radi mjehurića uzduha u masi betona težina betona može biti smanjena, iako je gustoća betona koji obavija mjehuriće povećana, jer smo smanjili vodocementni faktor.

Nije ispravno pri izboru nekog materijala imati pred očima njegove opće karakteristike, već dobar graditelj mora držati stalno na umu što gradi i koje su mu karakteristike materijala potrebne za baš taj zadatak.

Za gradnju spomenutog nadmorskog zida daleko je važnija otpornost protiv smrzavanja i sulfatima od čvrstoće betona, pa nam u tom slučaju te osobine daju kriterij o kvaliteti betona.

Bolja ugradljivost aeriranog betona pokazuje se u manjoj segregaciji, a time i u homogenijoj masi betona.

Razmotrimo sada efekt agensa za aeriranje kako na cement, tako i na fini i krupni agregat betona, kako bismo bolje shvatili nastala svojstva aeriranog betona.

Ako se čisti cement, kome je dodan određeni procent agensa za aeriranje, miješa s vodom u miješalici, uvlače se male količine udzuha i cementno tijesto ne postaje plastičnije, već bi se moglo reći da se i skrućuje. Tek ako se cementu doda nekoliko puta veća količina agensa i ako se smjesa miješa s vodom velikom brzinom, uvući će se veće količine uzduha i stvrdnuto tijesto može imati toliko mjehurića uzduha da postaje tako lagano da pliva na vodi.

Možemo dakle reći da prisustvo veće količine cementa sprečava uvlačenje uzduha.

Isto je tako opaženo da i sitan pijesak, veličine zrna ispod 0,074 mm sprečava uvlačenje uzduha kao i cement. Ako pak aerans dodajemo u određenoj količini smjesi finog agregata i vode, te na odgovarajući način miješamo, dobit ćemo žitku masu, jer sitni mjehurići između zrnaca agregata djeluju kao podmazivač koji smanjuje trenje između zrnja. Zbog toga aerirani beton već svojim izgledom sliči na neku želatinoznu masu, pa mnogo bolje podnosi i dulji transport, a da se pri tome homogenost smjese ne kvari.

Pokusi su pokazali da pijesak veličine zrna od 0,6 do 0,15 mm najviše pridonose uvlačenju uzduha, dok veća zrna vrlo malo utječu na taj proces. Iako najsitnija zrna sprečavaju stvaranje mjehurića uzduha, treba se kod izrade aeriranog betona pridržavati svih normi granulacije agregata. Pokazalo se dapače da 5% agregata veličine zrna manjeg od 0,15 mm povoljno djeluje na čvrstoću aeriranog betona.

Zaobljene čestice pijeska bolje uvlače uzduh od oštrobridnog drobljenca, a silikatni pijesak npr. uvlači više uzduha od pijeska vapnenca. I temperatura utječe na količinu uvučena uzduha. Na nižim temperaturama uvlačenje uzduha je snažnije.

Tvrdoća vode također utječe na uvlačenje uzduha; upotrebom tvrđe vode količina uzduha opada.

Optimalna količina uvučena uzduha kreće se normalno u granicama od 3 do 6%, ali taj procent treba mijenjati prema količini cementa u betonu, prema maksimalnoj veličini zrna agregata i prema svrsi kojoj je beton namijenjen.

Kad za armirano-betonske konstrukcije radimo beton s oko 300 kg cementa, trebamo nastojati da uvučeni uzduh iznosi 3...4% kako ne bi smanjena čvrstoća bila znatnija, a da obradivost ipak bude zadovoljavajuća.

Kako smo već kazali, betoni bogatiji cementom zahtijevaju manje količine uvučena uzduha, a oni siromašniji cementom veće.

Beton bogat cementom već je ugradiv sam po sebi, pa uvučeni uzduh u takvu betonu niti ne ispoljava svoje osobine.

Ako je mješavina betona izrađena sa 400 kg pa i više cementa, uvučeni uzduh štetno djeluje na čvrstoću. Ako nam je to važno za određenu svrhu betona, treba smanjiti procent uvučena uzduha. Dodatkom aeransa dobivamo povećan volumen betona uslijed mehurića uzduha, iz čega rezultira da na 1 m³ betona dolazi manje cementa.

Možemo praviti pokuse tako da ostavimo isti vodocementni faktor uz smanjenje količine cementa prema umanjenoj potrebi dodatka vode, ili smanjenjem V/C faktora povećati čvrstoće betona. Uz jednak vodocementni faktor može se uštedjeti na utrošku cementa 20...45 kg za svaki m³ gotova betona.

Isto je tako važna maksimalna veličina zrna upotrebljenog agregata. Što je agregat krupniji, to treba manje uvučena uzduha u betonu. U betonu koji ima zrna do 150 mm sadržaj uvučena uzduha treba da je 2,5...3%, a ako je najveće zrno do 37 mm, može se dopustiti količina uzduha do 6%.

Radi bolje ocjene i orijentacije dajem tablice o količinama pijeska, vode i uvučena uzduha za klasičan i aerirani beton, prema američkim pokusima.

Vodocementni faktor $V/C = 0{,}75$.

Prirodni zaobljeni agregat

Tablica 18

Klasičan beton			Aeriran beton		
Maksimalna veličina zrna grubog agregata u mm	Pijesak u % ukupnog agregata (aps. vol.)	Neto sadržaj vode u 1m³ betona	Preporučen sadržaj uzduha u %	Pijesak u % od ukupnog agregata (aps. vol.)	Neto sadržaj vode u 1 m³ betona
18	46	185	5 ± 1	42	160
25	41	180	4,5 ± 1	37	155
37	37	170	4 ± 1	34	145
51	34	160	4 ± 1	31	140
76	31	150	3,5 ± 1	28	135
152	26	130	3 ± 1	24	120

Tablica 19

Klasičan beton			Aeriran beton		
Maksimalna veličina zrna grubog agregata u mm	Pijesak u % ukupnog agregata (aps. vol.)	Neto sadržaj vode u 1m³ betona	Preporučen sadržaj uzduha u %	Pijesak u % od ukupnog agregata (aps. vol.)	Neto sadržaj vode u 1 m³ betona
18	50	200	5 ± 1	46	175
25	45	195	4,5 ± 1	42	170
37	41	185	4 ± 1	38	160
51	38	175	4 ± 1	35	155
76	35	165	3,5 ± 1	32	145
152	30	145	3 ± 1	27	130

Aerirani beton nepropusniji je od običnog betona, jer mjehurići uzduha umanjuju kapilarnost betona, smanjuju kapilarni tlak i sprečavaju difuziju soli.

Ovdje bih želio spomenuti da se aerirani betoni ne zamjenjuju s pjenušavim, koji se dobiju ako se betonu dodaju stanoviti produkti kojima postižemo lake betone. Ovi dodaci stvaraju u betonu veće mjehure i time mu smanjuju težinu, ali i čvrstoću. Aeransi za uvlačenje uzduha stvaraju sitne mjehuriće od 50 do 250 mikrona, koji su stabilizirani u masi betona.

Prednosti koje nam daje aerirani beton, naročito za pomorske radove, npr. za blokove koje izrađujemo na suhu i gotove polažemo u more, za nadmorske zidove itd. velike su. Poboljšanje ugradivosti, povećanja nepropusnosti uslijed veće homogenosti mase betona, veće otpornosti protiv agresije sulfata i otpornosti protiv smrzavanja i segregacije ne smijemo zanemariti, jer time povećavamo trajnost izrađenog objekta.

Agensi za aeriranje svakako su velik dobitak u daljnjem poboljšanju traženih karakteristika betona, pa ih treba upoznati i nastojati koristiti njihove dobre osobine.

Na kraju dajem nekoliko inostranih tvrtki koje izrađuju i prodaju najpoznatije aeranse:

Darex: Dewer & Almy Chemical Co. 62 Whittemore Ave, Cambridge 40 Mass, Chicago.

Vinsol: Hercules Powder Co. Savannah, Chicago in San Francisco
Barra 55-Vinsol, Barra 56, Darex AEA: Società Barra Italiana, Milano Via Durini 25

Plastocrete: Kaspar Winkler & Co. Zürich 48 — Altstetten.
Darex AEA: Vedag, Frankfurt am Mein, Mainzer Landstr. 195—217

UPOTREBLJENA LITERATURA

R. F. Blanks i H. L. Kennedy: *Technology of Cement and Concrete.*

M. Duriez: *Quelques développements sur les ciments actuels et les agrégats en vue de la réalisation de mortiers et de bétons.* Travaux, oktobar, 1961.

R. L'Hermite: *O nekim općim pojavama tehnologije betona.* Naše građevinarstvo br. 5, 1953.

R. Stepančić: *Preventivni ukrepi pri betoniranju betonskih kostrukcij in elementov.* Posvetovanje o zaščiti betona in betonskih konstrukcij 1960.

DODACI ZA POVEČANJE NEPROPUSNOSTI BETONA, TE ZAŠTITNI PREMAZI PROTIV PRODIRANJA VODE U MASU BETONA

Produkti koji se kod miješanja dodaju betonu radi povećanja nepropusnosti dolaze u trgovinu pod svim mogućim imenima. Njihovo djelovanje bazira uglavnom na hidrofobnom utjecaju na pore i kapilare betona.

Svi ovakvi dodaci na bazi sapuna, ulja ili vegetabilnih materija, koji bubre u dodiru s vodom pokazali su se loši i danas se odbacuju. Izvrsne rezultate postiglo se dodavanjem trikosala, sike i cerezita, pa se oni još danas mnogo upotrebljavaju, ali samo gdje je to prijeko potrebno. Ako nam beton nema dobar granulometrijski sastav agregata, ili ako je miješan s previše vode, ili je kod ugradbe ili transporta segregirao, on će biti propustan. U ovakvim slučajevima nikakvi dodaci za povećanje nepropusnosti ne koriste. To su međutim najčešći razlozi zbog kojih nam je beton propustan. Uspije li nam učiniti beton nepropusnim, pa želimo radi sigurnosti kakav dodatak, najbolje je uzeti cement još finijeg mliva, ili kao dodatak upotrijebiti fino mljeven ledbeći pepeo ili koji drugi pucolan. To je jeftinije, a sigurno će dati dobre rezultate. Sličan efekt postići ćemo i dodavanjem plastifikatora koji povećavaju obradivost betona i smanjuju dodatak vode, a time povećavaju nepropusnost. Aeransi će također u takvim slučajevima dobro poslužiti kao dodaci koji povećavaju nepropusnost betona. Ako nam beton mjestimice nije uspio u pogledu nepropusnosti, ili je nakon nekog vremena počeo pokazivati lokalne znakove korozije, provodimo sanaciju injektiranjem ili torkretiranjem, a katkada primjenjujemo i oboje, već prema prilikama i mogućnostima. Pod vodom ćemo vršiti injektiranje, a na suhu torkretiranje ili torkretiranje i injiciranje. Iako su to samo popravci betona koji je propustan, smatram ih ipak boljim i sigurnijim načinom asanacije od svih premaza.

Svi premazi, kako sam već rekao, samo su povremene i palijativne mjere pa ih treba svakih nekoliko godina obnavljati, naročito ako su izloženi direktnom utjecaju sunca i kiše ili potapanju i sušenju u morskoj vodi.

Na tržištu ima danas bezbroj preparata pod različitim nazivima, i zaista je teško kazati koji su bolji i trajniji, te koji bolje odolijevaju moru, suncu, kiši ili kemijskim napadima iz samog betona.

Njihovo djelovanje možemo podijeliti u nekoliko vrsta, pa ću se ovdje dotaknuti samo tih nekoliko glavnih grupa.

Jedna velika grupa su fluati. Oni stvaraju s oslobođenim vapnom portlanda netopljive produkte. Premazi fluata povećavaju otpornost površine na habanje, te zaštitu protiv agresivnog djelovanja vode. Kao najpoznatije fluate, odnosno fluorsilikate, spominjem fluate cinka i magnezija

Druga grupa su produkti koji na površini betona stvaraju otporne silikate i time povećavaju nepropusnost i otpornost površine. Kalijev silikat daje bolje rezultate od natrijeva silikata. U novije vrijeme pojavili su se različiti premazi na bazi vinila. Pokazuju dobre rezultate, ali se još ne zna njihova trajnost. Ima još preparata na bazi sinola, a na koncu bih spomenuo i bitumenske premaze. Prvi sloj bitumenskih premaza treba da bude uvijek u hladnom stanju.

Hladni premaz ili je rastopina bitumena u nekom topljivom a brzo hlapivom rastvoru, ili emulzija razmiješanog bitumena u vodi. Bitumen se energično miješa u emulgatoru i tako stvara stabilnu mješavinu. Na hladan premaz najčešće se stavlja vruć premaz u debljini sloja 1...3 mm.

Trajnost bitumenskih premaza računa se oko 4 godine.

Napominjem da protiv kemijskog djelovanja različitih ulja, npr. u dokovima od ispiranja i otvaranja motora i tenkova, ili u lukama gdje ulja plivaju po površini mora, veću otpornost pružaju premazi katrana nego bitumena.

Katranski i bitumenski premazi sprečavaju u morskoj vodi razvoj morske flore na površini, za koju znamo da je od koristi kod karbonizacije površinskih slojeva, i da tako štiti beton od agresije morske vode.

UPOTREBLJENA LITERATURA

C. R. Platzmann: *Bautenschutzmittel.*

E. Probst: *Handbuch der Betonsteinindustrie.*

A. Humel: *Das Beton—ABC.*

M. Duriez: *Quelques développements sur les ciments actuels et les agrégats en vue de la réalisation de mortiers et de bétons repondant aux exigences modernes.* Travaux, 1961.

BETONIRANJE ZA HLADNA VREMENA

Iako ova tematika nije specifičnost pomorskog betoniranja, osvrnut ću se i na taj problem, jer se često na betoniranje za hladna vremena pogrešno gleda i krivo primjenjuju potrebne mjere i upute.

Poznato je da se s padom temperature produžuje vrijeme vezanja, a ako dođe do smrzavanja dodane vode u smjesi betona, vezanje se potpuno prekida. Budući da se za vrijeme vezanja razvija toplina hidratacije, do smrzavanja dodane vode ne dolazi kod 0 °C, pa se može betonirati bez opasnosti od smrzavanja do oko —4 °C, naročito ako radimo s većim masama betona.

Teoretski to odgovara, ali se opazilo da beton gubi svoje kvalitete i čvrstoću ako veže i kod temperatura viših od 0 °C.

Pokusima se ustanovilo da betonske kocke koje su za vrijeme vezanja držane na temperaturi do +5 °C ne samo da sporije vežu, već osjetno gube i na čvrstoći u poređenju s čvrstoćama istog betona koji je stvrdnjavao na temperaturi od +15 do 20 °C. Pad tlačnih čvrstoća poslije 7 dana starosti iznosio je 1/2 do 2/3 normalnih čvrstoća. Nadalje se pokazalo da betoni koji su vezali za hladna vremena ni poslije 6 mjeseci starosti nisu dostigli čvrstoće betona koji je normalno vezao, na temperaturi od +20 °C, a bio je star samo 56 dana.

Kao pravilo treba uzeti da temperatura zraka ispod +10 °C za betoniranje označuje već oprez, pa treba računati s padom čvrstoća i polaganijim vezanjem. Opasnost je povećana ako je uz hladnoću još vrijeme vlažno i maglovito. Kao vlažno vrijeme razumijeva se vlažnost zraka veća od 70%.

Ako nas plan rada sili da betoniramo i u takvo prohladno vrijeme, moramo poduzeti sve potrebne mjere predostrožnosti i računati unaprijed da će nam beton dati smanjene čvrstoće. Potrebno je konstantno uzimati pokusne kocke, koje treba držati na otvorenu, uz iste uslove pod kojima stvrdnjava i beton gradilišta. U to vrijeme treba nadalje biti na oprezu pri skidanju oplate i ne oslanjati se samo na propisane rokove koji su dani za normalno vezanje i stvrdnjavanje.

Vrijeme vezanja na temperaturi od 1 do 3 °C produžuje se prema normalnom za 3 do 7 puta, a to važi i za normalne portland-cemente i za visokovrijedne cemente. Aluminozni cement vrlo malo reagira na ovakve hladnoće, pa se može kazati da je neosjetljiv i najotporniji za betoniranje u hladnim danima.

Ako betoniramo pilote, montažne grede itd., koje naknadno ugrađujemo, najbolje je takova betoniranja vršiti u zatvorenim barakama, koje se mogu i umjereno zagrijavati. Naravno da izbetonirane konstrukcije treba ostaviti u zatvorenom za čitavo vrijeme stvrdnjavanja betona.

Ukoliko smo prisiljeni raditi na otvorenom, a postoji mogućnost nastupa hladnog i vlažnog vremena, dobro je betonu dodavati akceleratore vezanja i plastifikatore, jer oni nam povećavaju ugradljivost i smanjuju vodocementni faktor. Smanjenje dodavanja vode bit će svakako od koristi kod radova za vrijeme smrzavanja. Dodavanje agensa za aeriranje također je povoljno, naročito ako pretpostavljamo da može doći i do pada temperature ispod 0 °C, tj. do smrzavanja.

O svim tim dodacima, plastifikatorima, aeransima, akceleratorima i kemijskim spojevima koji snizuju i tačku smrzavanja govorio sam u ranijim poglavljima, pa ih treba u ovakovim situacijama i primjenjivati.

Od kemijskih spojeva koji se najčešće upotrebljavaju kod betoniranja za vrijeme smrzavice napominjem NaCl i $CaCl_2$. Način upotrebe i reagiranje betona na te dodatke opisan je u poglavlju o plastifikatorima, odnosno akceleratorima. Dodatkom kuhinjske soli (NaCl) spušta se tačka smrzavanja vode, i to uz dodatak od 5% NaCl, na —3 °C, a uz 20% na —12 °C.

Osim spomenutih soli prodaju se u trgovini već gotovi preparati, koji se obično rastapaju u vodi i tako rastopljeni dodavaju betonu. Ovi preparati učinjeni su uglavnom na bazi kalcijeva klorida. Od tih preparata napominjem Antifrosto, koji izrađuje tvrtka Kaspar Winkler & Co. Zürich 48, Altstetten i Solifast, koji izrađuje tvrtka D. Büchtemann & Co. G. m. b. H., Hamburg.

Pri kraju ovog razmatranja htio bih još upozoriti na betoniranje objekata koji se izvode u zemlji. Rašireno je mišljenje da okolna zemlja štiti beton od rashlađivanja i da tu nema opasnosti za beton. Vrlo često nije tako, a može biti i obratno.

Ako je mraz trajao nekoliko dana zemlja se rashladi, naročito ilovača, te ostaje hladna iako je zrak već mnogo topliji. Bilo je slučajeva da kad je temperatura zraka iznosila +10 °C, temperatura zemlje bila je —4 °C. Kako se obično kontrolira samo temperatura zraka, može lako doći do neugodnih iznenađenja, naročito ako se betonira direktno u iskopanoj jami bez oplate za temelj ili potporni zid.

Ovim kratkim izlaganjem htio sam samo letimično upozoriti na neke pojave kod betoniranja za hladnih jesenjih dana, koje mogu imati vrlo neugodne posljedice za beton.

Kod nas u Primorju takova zahlađenja nisu dugotrajna ni česta, ali ipak treba i o njima voditi računa i znati ih preduhitriti.

UPOTREBLJENA LITERATURA

A. Kleinlogel: *Winterarbeiten im Beton und Eisenbetonbau.*

E. Mörsch: *Der Eisenbetonbau*, I. Band.

R. Grün: *Der Beton.*

Kögler—Scheidig: *Baugrund und Bauwerk.*

O. Graf: *Einige Untersuchungen die zur Klarstellung der Ursache von Bauschäden im Wasserbau beizutragen hatten.* Beton und Eisen, 1925, str. 51.

O. Graf: *Uber das Verhalten von Mörtel und Beton bei tiefen Temperaturen.* Beton und Eisen, str. 244.

F. Böhm: *Das Betonieren bei Frost.*

I. A. Voronov: *Morskie sooruženiy iz betona i železobetona.* Moskva, 1950.

VIBRIRANJE BETONA

Smatram za potrebno da se s ovim načinom ugradbe betona nešto više pozabavim, jer me na to upućuje iskustvo s gradilišta. Projektant, da bi bio »napredan«, u svom opisu radova navodi da se beton mora ugrađivati vibriranjem, a izvođač donosi na gradilište nekoliko vibratora i najčešće prepušta rad poslovođi i betoniricima.

Nije dovoljno samo vibrirati, pa da se već tim samim postigne beton onakve kvalitete kakvu mi želimo. O rezultatu vibriranja odlučuje vrsta, frekvencija i jakost vibratora, konzistencija betona koji se ugrađuje, granulometrijski sastav agregata, krupnoća najvećih zrna i način vibriranja.

Samo poznavanjem svih tih faktora, koje prije početka radova treba na gradilištu još i preispitati, dobit ćemo sve one uštede i koristi koje vibriranjem možemo postići. U protivnom, nepravilnim radom i lošim izborom materijala i količine vode možemo postići i beton loših kvaliteta, koji je segregirao i koji nije čvrst ni kompaktan.

Jedna od najvećih prednosti vibriranog betona je ta, što se vibriranjem može ugrađivati mnogo suši beton, s mnogo manje dodane vode, nego što je to bilo moguće ranije, kad se beton ugrađivao nabijanjem ili probadanjem. Vibriranjem dakle možemo smanjivati vodocementni faktor, čime povećavamo čvrstoću i gustoću betona, a često možemo smanjiti i dodanu količinu cementa, da uz smanjenu količinu dodane vode zadržimo isti vodocementni faktor.

Izložimo li masu betona vibriranju vidjet ćemo da beton postaje mekši, te da se pojedine čestice agregata kreću u masi betona. Kut trenja među česticama postaje manji i masa betona ima tendenciju širenja. Zrna s većom masom, odnosno težinom, poniru u masu betona pod djelovanjem sile teže, a zrak, voda i najsitnije čestice bivaju potiskivane prema gornjoj površini. Primijećeno je nadalje da sve čestice ne vibriraju jednako, što ovisi o frekvenciji i jakosti vibratora. Svako zrno imade svoju vlastitu frekvenciju vibriranja, koja ovisi o veličini mase tog zrna, pa ako vibrator ima približno istu frekvenciju kao što je vlastita frekvencija zrna, doći će do rezonancije u vibrirnaju tih zrna.

Prema L' Hermiteu izračunate vlastite frekvencije zrna u minuti približno su:

$n = 600$	$D = 39$ cm
$n = 1\,500$	$D = 6$ cm
$n = 3\,000$	$D = 1{,}5$ cm
$n = 6\,000$	$D = 0{,}4$ cm
$n = 12\,000$	$D = 0{,}1$ cm

Ranije se pri ugradbi betona udaralo čekićem po oplati i to se smatralo nečim sličnim vibriranju. Iz gornjega je jasno da takav način ugradbe ne može dovesti čestice betona u stanje vibriranja.

Općenito možemo kazati da vibratori niskih frekvencija od 1 500 do 2 000 titraja u minuti dovode u gibanje velika zrna agregata, oni od 3 000 do 6 000 pijesak, a oni od 8 000 do 20 000 najsitniji pijesak i čestice cementa.

Ako dakle vibriramo masu betona vibratorom frekvencije ispod 1 000 titraja u minuti kretat će se samo krupniji agregat, a da se pri tome cementni mort ne smekšava i ne prelazi u tekuće stanje. Vibriramo li beton vibratorom visoke frekvencije krupni agregat će skoro mirovati, a djelovanje vibracija prenosit će se uglavnom samo na cementni mort.

Bilo bi interesantno vibrirati beton najprije s vibratorom niske frekvencije, koji bi stavio u kretanje najkrupniji agregat, a odmah nakon toga s vibratorom visoke frekvencije, koji bi zbio cementni mort i sve prostore oko definitivno razmještenih krupnijih zrna.

Za praktičnu upotrebu, pri vibriranju normalnog betona može se kazati da vibratori frekvencije ispod 3 000 ne pokazuju prave rezultate.

Efikasna frekvencija (broj titraja u minuti), kako sam već kazao, za običan normalan beton bila bi oko 6 000 do 8 000 titraja.

Budući da se za kvalitetan beton u prvom redu traži što veća čvrstoća i gustoća, moramo kako znamo, nastojati da u prvom redu dobijemo kvalitetan, dobro zbijen cementni mort, koji odlučuje o karakteristikama betona. Da bi se mort što bolje zbio treba upotrijebiti vibratore što viših frekvencija, pa se danas već izrađuju vibratori sa 16 do 20 000 oscilacija u minutu.

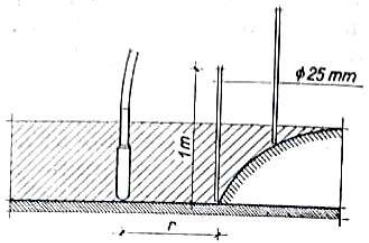
Pri efikasnosti vibriranja, osim frekvencije vibratora, važnu ulogu igra i njegova jakost. Ovdje pod jakošću podrazumijevamo korisnu energiju koju vibrator prenosi na beton, a ne onu koju aparat kao takav posjeduje.

Otpor koji se javlja protiv zbijanja pojedinih zrna agregata potječe uglavnom od sila kohezije između samog zrnja i cementnog lijepa, koji obavija površinu svakog zrna. Razumljivo je da će vibrator veće jakosti energiju koju prenosi na pojedine čestice prenositi na veću udaljenost od slabijeg vibratora. Općenito možemo kazati da o frekvenciji oscilacija ovisi zbijenost betona, a o jakosti veličina zone djelovanja vibratora.

Ako je krug zbijanja oko vibratora veći trebat ćemo manje puta uvlačiti vibrator u masu betona, pa će rad na ugradbi i zbijanju biti brži.

Prema njemačkim propisima DIN 4235 razmak mjesta uvlačenja vibratora treba da je takav da se krugovi djelovanja nešto preklapaju. Veličina radijusa kruga djelovanja ovisi o jakosti vibratora, o granulometrijskom sastavu i konzistenciji betona. Za vibratore većih brzina radijus djelovanja iznosi 60 do 80 cm. Ovaj podatak samo je orijentacioni i treba ga na gradilištu stalno provjeravati. Postupak koji je predložio L' Hermite vrlo je jednostavan i može se vršiti s lakoćom na svakom gradilištu. Vibrator se postavi na izabranu tačku nanešenog, još ne vibriranog betona. Na stanovitoj udaljenosti od vibratora, na kojoj se još očekuje njegovo djelovanje, postavi se vertikalno čelična šipka 1,0 m dužine, ∅ 25 mm, i to tako da njen donji kraj tek dodiruje površinu betona. Kada se vibrator pusti u rad šipka pod djelovanjem vlastite težine počne tonuti u masu betona, i treba da utone za čitavu visinu nasutog sloja betona, ako se on već nalazi u stanju tečenja.

Najudaljenije mjesto od vibratora na kom je šipka utonula do dna odgovara radijusu djelovanja vibratora u tom smjeru, a vrijeme za koje šipka na udaljenosti r utone do dna odgovara potrebnom vremenu da na tom mjestu beton dođe u tekuće stanje.



Slika 17

Vibrator treba dakle postavljati na novo mjesto u udaljenosti 2 r, a na taj način mjerimo i vrijeme koliko treba vibrirati masu betona s jednog mjesta, a da vibriranje bude homogeno po čitavom presjeku. Što je veći broj vibracija potrebno je manje vremena za zbijanje betona, pa se na ugradbi uštеđuje s brzim aparatima.

Vijek trajanja brzih vibratora manji je međutim od onih sporijih, često i osjetno, pa pri izboru vibratora treba o svemu tome voditi računa, i izabrati one tipove koji za dani slučaj daju najekonomičnije rješenje i najkvalitetniji beton.

U masivnom betonu vrlo je ekonomična i dobra upotreba što krupnijeg zrna agregata. Time se u prvom redu štedi cement, a smanjuju se i temperaturna naprezanja u masi betona. Pri vibriranju betona s krupnim agregatom treba postupati vrlo oprezno. Vibratori treba da budu to jači što je agregat krupniji, da mogu potiskivati najkrupnija zrna, a da se pri dodiru s većim kamenjem ne kvare. U praksi sam često vidio da se normalni brzohodni vibratori vrlo brzo pokvare kada udaraju u veće kamenje. O tome će biti govora i kasnije. Nadalje treba paziti da se kod vibriranja ispod većeg kamenja ne stvaraju džepovi ispunjeni zrakom ili slojevi puni vode, ako smjesa sadrži previše vode.

Ako raspolažemo s vrlo jakim vibratorima možemo ići i do 20 cm veličine zrna, ali tada za kompaktan beton mora smjesa da sadrži srazmjerno malo morta, miješanog s malo vode.

Ubacivanje velikog kamenja u vibrirani beton vrlo je opasno i ne preporučuje se, jer teško je postići kompaktan, jednolik i nepropustan beton zbog spomenutih neprilika.

Vibrator koji je u pogonu ne smije dodirivati nikakve čvrste predmete, npr. stvrdnuti beton, kamen, čelik itd., jer tada nastaju jaki udari koji mogu oštetiti valjkaste ležajeve aparata. Kada motor radi, a ne nalazi se u masi betona, vibrator treba uvijek da leži na mekoj podlozi. Na ovo treba naročito upozoriti radnike koji rukuju vibratorom, jer otuda proizlaze najčešći kvarovi aparata.

Važno je još napomenuti da je djelovanje zbijanja vibriranjem manje ako je agregat drobljenac, nego kada je agregat šljunak, tj. ako su zrna zaobljena.

Kako sam već rekao dobro vibriran beton, iako je prije vibriranja bio nešto mokriji od »vlažnog kao zemlja«, postaje za vrijeme vibriranja potpuno židak. U ovom stanju beton pritišće na oplatu hidrostatski kao tekućina odgovarajuće gustoće, ali teoretski samo u visini sloja koji se vibrira. Ako se ugradba vrši brzo mogu i niži slojevi, koji su već donekle vezali, uslijed

naknadne vibracije smekšati, pa treba za visinu žitkog sloja uzeti i to u obzir.

Pokusima je izmjeren kao najveći pritisak vibriranog betona na oplatu pri većim presjecima 0,45 kp/cm². Brzo nakon prestanka vibriranja taj pritisak pada na normalan pritisak betona koji je ugrađen nabijanjem. O ovim povećanim pritiscima treba voditi računa kod projektiranja i dimenzioniranja oplate. Ako beton vibriramo oplatnim vibratorima, naročitu pažnju treba posvetiti izradi i učvršćenju oplate. Što je oplata elastičnija djelovanje oplatnog vibratora je efikasnije, ali s druge strane oplata mora da bude čvrsta da odoli povećanim pritiscima tekućeg betona i direktnoj vibraciji same oplate, naročito njenih spojeva.

Konzistencija betona. Vibriranjem se može ugraditi beton, tj. dobiti dobar beton, iako je dodatak vode bio malen, a agregat grube granulacije s puno pijeska. Takav beton ručnom ugradbom nije moguće pravilno ugraditi, pa i uz najenergičnije nabijanje. Ako vibriranjem dobivamo ugradljiviji beton možemo, znači, smjesi dodavati manje vode, odnosno smanjiti vodocementni faktor.

Pokusima u laboratoriju pokazalo se da odabrani cement uz 23% vode daje tek slojno vlažnu smjesu, koja vibriranjem postaje tekuća. Ako količinu vode smanjimo ispod 23%, npr. 20%, vibriranjem se nije postigla potrebna žitkost. Ovaj podatak vrlo je važan i može nam poslužiti pri određivanju dodatka količine vode za izradu cementnog tijesta. Naravno da će u masi betona u kojoj je cementno tijesto razmješteno između zrna pijeska i većeg agregata, gdje se cementni lijep povezuje s najsitnijim česticama pijeska i omata površinu pojedinih većih zrna, trebati i veća količina vode od 23%.

Razumljivo je da pri odlučivanju o minimalnom procentu vode odlučuje i vibrator s kojim radimo, jer što je veća frekvencija vibratora to je veća i mogućnost daljnjeg smanjivanja dodatne vode, jer će i suši beton doći u stanje tečenja. Isto tako pri određivanju minimuma vode odlučuje vrsta i granulometrijski sastav agregata, pa se iz svega vidi da će uvijek prije određivanja potrebne količine vode trebati na gradilištu izvršiti stanoviti broj pokusa, i tako uz dane uslove odrediti najmanju količinu vode s kojom još uvijek postižemo dobar beton. Ako je laboratorij na gradilištu bolje opremljen, možemo konzistenciju određivati na ove načine:

Mjerenje konzistencije Abramsovim konusom. Za krute betonske smjese koje se ugrađuju vibriranjem pokazatelj konzistencije, koji se dobiva mjerenjem smanjenja visine, treba da iznosi manje od 4 cm.

Kod mekših mješavina betona, gdje možemo mjeriti rasprostiranje pod poznatim uslovima, može se kazati da do 35 cm rasprostiranja dobivamo bolje rezultate vibriranjem nego nabijanjem. Ako je rasprostiranje veće od 35 cm konzistencija tih plastičnih betona već je takova da vibriranjem ne poboljšavamo kvalitete betona, pa je bolje takav plastični beton probadati i lako nabijati.

Pod mjerom rasprostiranja podrazumijeva se dijametar betonskog uzorka rasprostrtog na vibracionom stolu u vidu zatvorene okrugle pogače. Tvrde smjese ne mogu se ispitivati ovim načinom.

Dužim vibriranjem plastičnog betona može doći i do oštećenja strukture betona, jer dolazi do segregacije krupnijih zrna agregata. Treći način

ispitivanja konzistencije betona, koji se lako može vršiti na gradilištu, jest taj da se izradi kalup 30x30x30 cm. Beton se sipa u kalup zidarskom žlicom s visine od 10 cm i odreže na gornjoj plohi. Tada se beton ili čvrsto nabija, ili podvrgne vibraciji do potpune zbijenosti, te izmjeri visina zbijenog betona h u milimetrima. Mjera zbijenosti V određuje odnos $300/h$. Tekuće mješavine betona imaju malu, a krući betoni veću zbijenost.

Za konzistencije betona koje su pogodne za vibriranje mjera zbijenosti treba da se kreće od $V = 1{,}42$ do 1,22.

Ovih nekoliko načina ispitivanja konzistencije betona dao sam, s podacima kontrole za vibrirani beton, kako bi se na svakom gradilištu mogla ta kontrola lako provesti, jer kako smo vidjeli konzistencija betona vrlo je važna za uspjeh vibriranja.

Najuspješnija mješavina betona za vibriranje jest smjesa nešto mokrija od vlažne zemlje, a kadkada i još tvrđe konzistencije.

Visina nasipanja betona koji će se vibrirati teoretski bi trebalo da bude što veća da dobijemo što jednoličniju izvibriranu smjesu, i da koristimo povoljan utjecaj vibriranja donjih dijelova, koji stoje pod pritiskom težine gornjeg betona. Nedostatak je pak prevelikih visina vibrirajućeg betona što voda i mjehurići zraka koji se penju prema površini ne dospiju prevaliti predug put, pa se zadrže u gornjim slojevima.

Daljnja je poteškoća još u tome što npr. kod velikih površina koje se vibriraju, i visokih slojeva, treba donositi velike količine betona. Kroz to vrijeme donji je sloj već toliko očvrsnuo da nastaju poteškoće kada želimo, vibrirajući gornji sloj, radi stvaranja bolje veze, vibratorom prodrijeti 10 do 20 cm u donji sloj. Treba nastojati da gornji sloj betona bude nanesen i stavljen u vibriranje najviše 1 do 2 sata nakon dovršetka vibriranja donjeg sloja, što ovisi o konzistenciji betona, vrsti cementa i vanjskoj temperaturi za vrijeme vezanja. Pokazalo se da je najpodesnija visina sloja 30...60 cm.

Brzina uvlačenja i izvlačenja vibratora najdjelotvornija je ako iznosi oko 8 cm/s. Pokazalo se da vibrator otprilike tom brzinom sam tone u izvibrirani beton, pa je to već znak da je beton došao u stadij tečenja. Pri izvlačenju vibratora treba također nastojati ostati kod takve brzine, da žitki beton nakon izvučene igle dospije potpuno ispuniti ostavljenu šupljinu.

Uz pretpostavku da u donji sloj uvlačimo vibrator oko 15 cm, trajanje vibriranja kod svakog uvlačenja iznosi:

Debljina sloja (cm)	Trajanje vibriranja (s)
20	9
30	11
40	14
50	16
60	19
70	21
80	24

Svakako je bolje da se vibrira nešto dulje nego premalo.

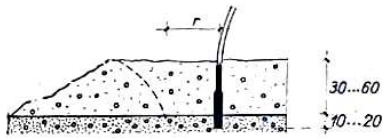
Radi kalkulacije dajem podatak o učinku na sat; koliko se može ugraditi betona vibratorom uz normalne uslove:

s lakim vibratorom	5... 8 m³/sat
s teškim vibratorom	10...20 m³/sat

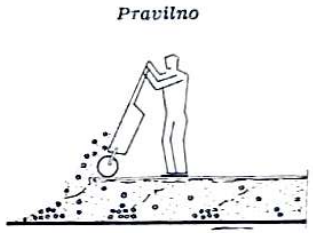
Danas se već proizvode i vrlo teški vibratori kojim rade po 2 radnika, a njihov se učinak penje i do 30 m³/sat.

Htio bih još dati nekoliko smjernica koje se odnose na nanošenje, ugradbu i vibriranje betona. Ove su smjernice uglavnom rezultati promatranja, ispitivanja i iskustva stečena u laboratorijima i na gradilištima.

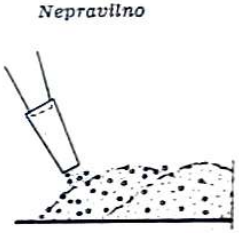
Kod nanošenja betona u slojevima treba nastojati nanijeti čim veću površinu, da radnik s vibratorom može slobodno provoditi plan vibriranja. Treba paziti da virbator ne bude postavljen preblizu gornjem rubu pokosa betona koji se nanosi, jer tada bi došlo do tečenja tekućeg betona po kosini, a time i do segregacije. Često se na takav način nastoji transportirati beton vibratorom, ali to nije pravilno. Vibrator mora svakako da bude dalje od gornje ivice pokosa betona nego što je njegov radijus djelovanja. Ne smije se bacati ni sipati beton po nastaloj kosini, jer na taj način također dolazi do segregacije i krupnija se zrna skupljaju na nožici nasipa. Najhomogeniju masu betona dobijemo ako se beton sipa nasuprot već nastaloj kosini betona, npr. kroz pokretne cijevi.



Slika 18



Slika 19



Slika 20

Ukoliko za vrijeme rada dođe do zabrtvljenja cijevi betonom, gurne se u masu betona u cijevi vibrator, beton postaje žitak i odmah proteče kroz cijev.

Ako se sloj betona nanosi na kosu podlogu treba s vibriranjem početi uvijek na nižoj strani i ići prema višoj strani. U protivnom bi nam već vibrirani beton ispoljavao tendenciju pomicanja prema nižoj strani, uslijed čega bi došlo do pucanja i razrahljenja već vibriranog betona, a na najnižoj tački bi se skupljala voda, odnosno cementno mlijeko.

Vibrator treba uvijek uvlačiti vertikalno u masu betona, zato jer pri kosom uvlačenju mogu lako nastati pojedini uglovi gdje beton ostaje nevibriran.

Kod uvlačenja vibratora blizu oplate ne treba ići bliže od 10 do 20 cm do oplate.

O djelovanju vibriranja na već vezani beton i armaturu. Kako je već rečeno, vibriranjem se voda i sitne čestice dižu prema gore, a krupniji agregat nastoji da silazi u niže slojeve. Što je beton plastičniji, to se više vode, mulja i cementnog mlijeka sakuplja na površini. Ako bismo na ovakav sloj nanijeli nov sloj betona, koji se potom vibrira, dobili bismo uvijek propusne slojeve manje čvrstoće na tim mjestima spoja. Radi toga je potrebno prije nanošenja novog sloja betona taj mulj i šupljikavi mort odstrani-

ti s površine, ili komprimiranim zrakom ili vodom pod pritiskom, četkanjem željeznim četkama ili skidanjem te površine šiljastim dlijetom. Nakon toga potrebno je površinu očistiti od komadića morta ili prašine, te isušiti mjestimične lokvice vode. Na tako očišćenu vlažnu površinu nanosi se sloj debljine 5...10 cm cementnog morta ili sitnozrnata betona u smjesi od oko 500 kg cementa umjereno tvrde konzistencije. Nakon vibriranja toga sloja nanosi se odmah normalan sloj betona, koji se također vibrira. Taj sloj finijeg i masnijeg sastava potreban je radi bolje veze s prvim slojem, pa što su krupnija zrna gornjeg sloja, koja za vrijeme vibriranja propadaju spram dolje, to više tonu u tu masu, pa dobivamo čvršći i nepropusniji beton.

Poznato je da se u razdoblju dok beton veže i stvrdnjava ne smije tresti udarcima po oplati i skeli, ako je ona u vezi sa oplatom. Trešnje nastale od takvih udaraca, hodanja ili vožnje kolica štetno djeluju na beton, i zabranjene su. Beton uslijed takvih trešnja i pomaka puca, a pukotine ostaju trajne.

Sasvim je drugo ako beton u stadiju stvrdnjavanja podvrgnemo visokofrekventnim vibracijama. Mnogi pokusi su pokazali da beton nakon 5...10 sati starosti, ako je naknadno podvrgut vibriranju, postaje postepeno opet kašasto mek i povećava svoju čvrstoću. Povećanje čvrstoće tumači se tako što beton ponovnim vibriranjem izbacuje na površinu suvišnu vodu, čime se smanjuje prvotni vodocementni faktor. Osim toga ponovnim vibriranjem popunjuju se zaostale pore u betonu te beton, osim povećane čvrstoće, povećava i nepropusnost.

Ranije smo kazali da novi sloj treba po mogućnosti nanositi do 2 sata nakon vibracije prvog sloja. Neka ne dovodi do zabune to što se na prvi pogled čini da je u kontradikciji s onim gore. Ako bismo vibrirali i skoro stvrdnut beton, možemo ga bez štete ponovno smekšati, a vibracije ne ostavljaju nikakve pukotine. Ako pak kontinuirano betoniramo i vibriramo, ne bismo mogli u već očvrstao beton utjerati vibrator i povezati oba sloja u jednu cjelinu. Gubili bismo mnogo vremena, imali poteškoća i ne bismo bili dovoljno sigurni da smo po čitavoj spojnoj plohi dvaju betona postigli dobru i homogenu vezu.

Ovdje bih želio da se osvrnem na jedan nov pokušaj, koji se u najnovije vrijeme mnogo ispituje u Francuskoj, SSSR-u, SAD-u, Poljskoj itd., u laboratorijima i na gradilištima, a to je: **revibracija.** Ova nova tehnika vibriranja potpuno se uobičajila u zapadnoj Evropi, te naročito u SAD-u, jer se pokazalo da su poboljšanja betona tom tehnikom značajna, naročito u prvo vrijeme.

Revibriranje svježeg betona znači ponovno vibriranje već ugrađenog i ranije vibriranog betona.

Revibracija se često provodi i kraće vrijeme od prve vibracije, tj. oko 15 s, ali to ne mora biti pravilo; katkada revibriranje traje isto vremena kao i vibriranje.

Revibriranjem se povećava gustoća i čvrstoća betona, koliko tlačna toliko i vlačna, a osim toga se zatvaraju i mikropukotine nastale od stezanja i prebrzog sušenja vode u već ugrađenom betonu.

Pokusi u SSSR-u pokazali su da revibrirani beton ispitivan nakon 48 sati povećava tlačne čvrstoće i do 70%. I kasnije čvrstoće veće su od prvotnih, ali razumije se ne tako osjetno. Francuski pokusi pokazali su nakon 48

sati starosti betona povećanje tlačne čvrstoće za 40%, a vlačne za 25%. Ove razlike u povećanju čvrstoća ne treba da nas čude, jer kasnije će se vidjeti od kakve je važnosti za povećanje čvrstoća količine dodane vode, i drugi faktori.

Povećanje čvrstoće betona baš u njegovoj ranijoj dobi od velike je važnosti jer nam omogućuje brže skidanje oplate, a to može biti važan faktor u ukupnim troškovima, naročito u serijskoj proizvodnji.

Razmotrimo sada kako utječe dodatak vode u mješavini betona na rezultate revibracije. Izrađeni su najprije pokusi na minimumu vode i pijeska ovog sastava:

350 kg portland-cementa velike čvrstoće
1 200 kg riječnog šljunka 5/15 mm
760 kg riječnog pijeska 0,3/mm
140 l vode

Opaženo je da se revibracijom ovako suhih i krutih betona ne postiže nikakvo povećanje čvrstoće, već najčešće njezin pad. U drugom slučaju, kada je vodocementni faktor mješavine bio 0,40, opaženo je smanjenje čvrstoće na pritisak od 25%, kada se je revibracija vršila 30 min, a 30% ako se revibriralo 90 min, nakon prvog vibriranja.

Iz ovoga slijedi da se krute i malo vlažne betone ne smije revibrirati.

Ali ako tim betonima dodajemo plastifikatore — usporivače rezultati se mijenjaju. Betonu s vodocementnim faktorom 0,37 ili sa 130 l vode dodalo se 0,5% vrlo blagog usporivača plastocreta.

Vidjelo se povećanje čvrstoća i nakon 7 i 28 dana, iako se revibracija provodila nakon 3 časa i 40 min. Poluplastični beton s vodocementnim faktorom 0,46 dao je već druge rezultate. Kada je revibracija uslijedila nakon 45 min, povećanje tlačne čvrstoće iznosilo je 25%, nakon 120 min 18%, a nakon 180 min samo 6%.

Za plastične betone s vodocementnim faktorom 0,57 rezultati su bili ovi: maksimalan porast čvrstoća bio je kad je revibracija uslijedila nakon 2 sata i iznosio je 45%. Kod revibracije nakon 150 min porast je iznosio 33%, a nakon 180 min još 12%.

Rezultati američkih pokusa pokazali su da normalan beton bez plastifikatora u optimalnom razmaku vibracija od 150 min dobiva povećanje čvrstoća od 16%, a uz dodatak od 1% plastifikatora plastimenta, kod revibracije nakon 165 minuta, povećanje od 21%. Dodatkom od 2% plastimenta, te revibriranja nakon 210 minuta, postiglo se povećanje čvrstoća od 35%.

Razumljivo je da se ne mora upotrijebiti samo plastifikator plastiment; isti se rezultati mogu postići i s drugim plastifikatorima — usporivačima, koji se danas već proizvode baš u svrhu revibracije.

Upotrebom usporivača ne samo da povećavamo dobivene čvrstoće skoro za dvostruk procent, već time proširujemo i rokove kada možemo uspješno vršiti revibraciju. To je vrlo važan momenat, jer nam on mnogo pomaže u organizaciji rada na vibriranju i olakšava planski redoslijed revibriranja.

Neki su kritizirali upotrebu usporivača, jer da radi toga treba beton duže da stoji u oplati. Kod revibracije nemamo taj slučaj, jer ako nam se

čvrstoće naročito rano znatno povise neće trebati duže držati oplatu, ona će se moći i ranije skinuti. O svemu tome odlučuje inženjer gradilišta koji prati zbivanja, te u svakom konkretnom slučaju određuje odgovarajući postupak. Budući da o reagiranju betona na revibraciju odlučuju mnogi faktori kao količina dodane vode, količina i vrst cementa, vanjska temperatura itd., a kako još do danas nisu sve te pojave naučno obuhvaćene i dokazane, ne može se unaprijed ni odrediti procent povećanja čvrstoća. Ovim izlaganjem dan je putokaz k novoj tehnici vibriranja, a svako gradilište treba da je koristi, to više, što je bolje prouči i organizira.

Teoretsko objašnjenje povećanja čvrstoće revibracijom tumači se tako da se ponovnim vibriranjem aktivira stvaranje novih kristala, koji pojačavaju i preformiraju već stvoreni skelet. Osim toga opasnost od stvaranja mikropukotina na površini betona kod kasnijeg vibriranja manja je, jer je termičko i higrometrijsko skupljanje kroz protekli period vremena već slabije.

Sa klasičnom jednokratnom vibracijom vidjeli smo da najbolje rezultate dobivamo s betonima malo vlažnijim od vlažne zemlje. Danas imamo i tačna ograničenja dodavanja vode za miješanje, a dokazano je da jače plastični betoni vibracijom uopće ne pokazuju poboljšanja. Nova tehnika revibracije mijenja nam i proširuje djelokrug rada. Vidimo da se s uspjehom može vibrirati i plastičnije betone, ali svakako uz stručnu kontrolu i praćenje svih zbivanja u betonu. Ako je bilo potrebno iz ma kojih razloga dodavati veće količine vode, revibracijom će se postići povoljni rezultati, što je i razumljivo, jer kroz 2...3 sata nakon što je beton već ugrađen gubi se dio vode na isparivanje, hidrataciju itd., stvaraju se novi povoljniji odnosi, pa ponovnim revibracijama, katkada i višekratno ponovljenim, postižu se gore prikazani rezultati. Svakako je preporučljivo uz tu najnoviju tehniku upotrebljavati usporivače, pa makar i u vrlo malim količinama od 0,5%.

I ovdje vidimo koliko tehnika i nauka iz dana u dan napreduju, kako se mijenjaju postavke koje su nam do jučer izgledale jasne i definitivne, i kako trebamo stalno pratiti taj razvoj, da možemo doista dobro i ekonomično graditi.

Sada se pozabavimo još pitanjem, što se događa s čeličnom armaturom koja se nalazi u mladom ali već stvrdnutom betonu, a koja je došla u stadij vibriranja uslijed rada vibratorom u gornjim slojevima, ili direktnim dodirom vibratora s armaturom.

Kao prvo treba napomenuti da nije uputno vibrator postavljati direktno na armaturu, i tako šipke dovoditi u stanje vibracije i u onom dijelu u kojem se one nalaze u već donekle stvrdnutu betonu. Kao drugo napominjem da je općenito otpor protiv izvlačenja čelične armature iz mase vibriranog betona manji kod horizontalnih nego vertikalnih šipki. To je naročito uočljivo kod mekih betona spravljenih s više vode, jer se voda za vrijeme vibriranja diže i zadržava ispod horizontalnih šipki, pa kasnije te šupljine i cementno mlijeko imaju manju prionljivost od normalne.

Ako šipke armature počnu vibrirati uslijed vibriranja gorjeg sloja betona neće doći ni do kakvog oštećenja otpora izvlačenja, ako donji sloj betona u kome se nalaze šipke nije još potpuno vezao, te koji uslijed novih vibracija ponovno postaje žitak. Isto tako neće doći do pada otpora klizanja

ako je donji sloj već potpuno očvrsnuo. Opasno razdoblje je od vremena kada beton nije više dovoljno pokretljiv da uslijed ponovnog vibriranja postane opet žitak, pa do vremena kada beton još nije tako čvrst da šipka čvrsto prianja uz njega. To znači kada je beton završio vezanje, dakle nakon 6 do 8 sati, nastupa početak vremena kada je opasno šipku ponovno vibrirati. Nastojao sam u ovom poglavlju dati niz praktičnih pravila i iskustva za izradu dobrog vibriranog betona, ali ponovno naglašujem da bez dobrog i odgovarajućeg granulometrijskog sastava neće biti ni veće koristi od vibriranja.

Vibriranje betona pod vodom ispitivalo se za sada samo u laboratorijama bez značajnijih rezultata, pa još ne postoje neka iskustva ni pravila za primjenu u praksi.

UPOTREBLJENA LITERATURA

L'Hermite: *La vibration du béton frais.*
L'Hermite: *La science du béton.*
J. Faury: *Le béton.*
F. Kaufman: *Über das Verdichten von Beton durch Rütteln.*
O. Graf—F. Kaufmann: *Versuche über das Verdichten von Beton durch Innenrüttler und über die Eigenschaften des gerüttelten Betons.*
A. Hummel: *Das Beton — A B C.*
E. Mörsch: *Der Spannbetonträger.*
R. Grün: *Der Beton.*
Kurt Walz: *Rüttelbeton.*
V. Juranović: *Beton i armirani beton.* Svezak I.
M. Ferjan: *Metode vgrajevanja betona.* Posvetovanje o zaštiti betona i betonskih konstrukcij 1960.

TORKRETIRANJE

Torkretiranje ili gunitiranje predstavlja način štrcanja cementnog morta pod pritiskom pomoću torkret-aparata ili tzv. topa za cement.

Suhom smjesom cementa i pijeska miješanom u miješalici puni se torkret-aparat, odakle strujom zraka suha mješavina prolazi kroz gumenu cijev do sapnice kojom stručni radnik vrši torkretiranje. Prije izlaska materijala iz sapnice dodaje se smjesi voda, tako da gotov cementni mort pod pritiskom udara na plohu koja se torkretira. Baš zbog toga što se cementni mort štrca pod pritiskom od nekoliko atmosfera, torkretna žbuka vrlo dobro prianja na plohu betona, gusta je i nepropusna, pa ima veliku čvrstoću na tlak i vlak. Čvrstoća torkretne žbuke na pritisak kreće se od 350 do 600 kp/cm².

Radi tih odlika torkretiranje se često primjenjuje u pomorskim radovima kao što su npr. izrada nepropusnih žbuka u dokovima, izrada čvrste žbuke na gatovima i obalama, te zaštita od erozije i udara, ispravci i pojačanja betonskih zidova, dokova, obala itd.; izrada tankih armirano-betonskih zidova, plivajućih dokova ili sanduka za gatove i obalne zidove itd.

U daljnjem izlaganju koristit ću se uglavnom ruskim propisima o torkretiranju, te nekim vlastitim iskustvima, u želji da dadem dovoljno podataka kako bi se torkretiranje stručno i dobro primjenjivalo u praksi.

Za torkretiranje treba upotrebljavati portland-cement ili pucolanski cement najniže marke PC 350. Najbolje je upotrebljavati onu vrstu cementa od koje je izrađen beton koji se torkretira.

Cement koji se upotrebljava za torkretiranje treba prije miješanja s pijeskom prosijati kroz sito s oknima od 1 mm, da se eliminiraju eventualni grumeni cementa koji bi mogli zabrtviti cijev ili sapnicu.

Pijesak mora da bude čist od organskih primjesa, oštrozrnat, različite veličine, maksimalne krupnoće zrna do 8 mm, ali bolje ne preko 5 mm. Srednja veličina zrnaca pijeska ne smije biti manja od 0,35 mm. Ako želimo žbuku što veće čvrstoće, pijesak ne smije sadržavati muljevitih sastojaka.

Vlažnost pijeska treba da se kreće od 3 do 5% po težini. Ako je pijesak manje vlažnosti od 3% nezgodan je za upotrebu jer se za vrijeme torkretiranja jako praši, te dobivamo na žbuci nehomogen izgled sa suhim mrljama, što nije dobro. Takav se suhi pijesak prije miješanja s cementom pomiješa s vlažnijim pijeskom, a vlažnost nove smjese treba da je barem 3%. Ako je pijesak vlažniji od 5% treba ga sušiti, jer se u radu s takvim pijeskom često začepe cijev i sapnica.

Granulometrijski sastav pijeska treba da je takav da u smjesi ostane čim manje šupljina. Ako se ne vrše ispitivanja sastava na gradilištu, a takva ispitivanja svakako se preporučuju, dajem radi orijentacije slijedeće težinske odnose cementa i pijeska, za različite položaje torkretirane plohe:

za torkretiranje podova kod kojeg je rada najmanje otpadaka	1 : 3,75
za torkretiranje vertikalnih površina	1 : 4,40
za torkretiranje stropova koji se štrcaju odozdo i gdje su gubici maksimalni	1 : 1,5

Ako želimo dobiti sloj kao zaštitu od erozionog djelovanja vode, smjesa treba da bude 1 : 2,5 do 1 : 3,75.

Miješanje suhe smjese mora se vršiti miješalicom, a miješanje treba da traje najmanje 2 minute. Pripremljenu mješavinu valja upotrijebiti najduže 1 sat nakon spravljanja.

Suhoj smjesi cement — pijesak dodaju se katkada preparati koji još povećavaju otpornost i nepropusnost žbuke.

Prigodom popravka armirano-betonskog plivajućeg doka u Kraljevici upotrijebljen je preparat Sigunit* u prahu, koji se dodavao suhoj smjesi i miješao u količini 2% od mase cementa.

Cement se dodavao 450...600 kg na m³ gotova torkreta, već prema sloju koji se izrađivao. Granulometrijski sastav pijeska za prvi sloj bio je ovaj:

0,1...0,6 mm	30%
0,6...1,5 mm	27,5%
1,5...3,0 mm	42,5%

a za drugi sloj:

0,1...0,6 mm	20%
0,6...1,5 mm	20%
1,5...3,0 mm	25%
3,0...7,0 mm	35%

Pijesak je bio dravski, tri puta pran.

Kako su stijene plivajućeg doka izvrgnute jako nepovoljnim uvjetima, jer se beton, osim što je izložen vjetru, suncu i mehaničkim udarima, često potapa u more i diže iz njega, pa tu igraju ulogu osim kemijskog djelovanja, nenormalne nagle promjene temperature.

Nakon popravka dok je u eksploataciji već tri godine, a torkret-žbuka pokazuje vrlo dobre rezultate.

Na jednom drugom objektu, gdje je bio trajan pritisak vode od 0,6 atm, dodavana je suhoj smjesi 2% od mase cementa Prolapinska** prašina također s uspjehom.

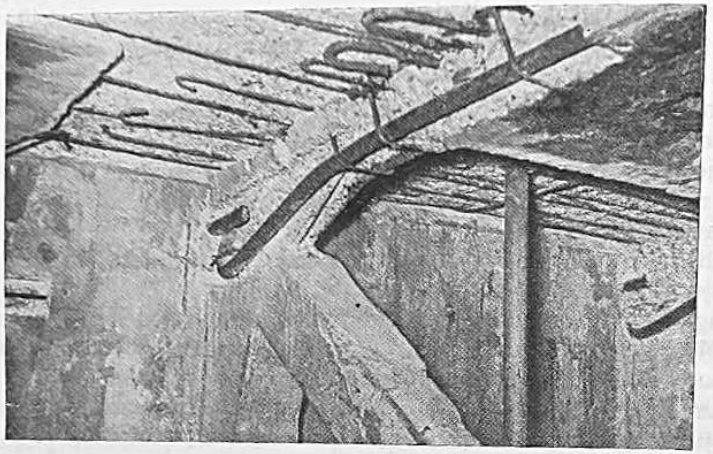
Osim spomenutih preparata dodaje se katkada i trikosal, cerezit itd., ali samo onda, ako to traže specijalno teški uslovi koji se postavljaju na funkciju žbuke.

Količina vode ne normira se već se određuje prema izgledu naštrcane žbuke.

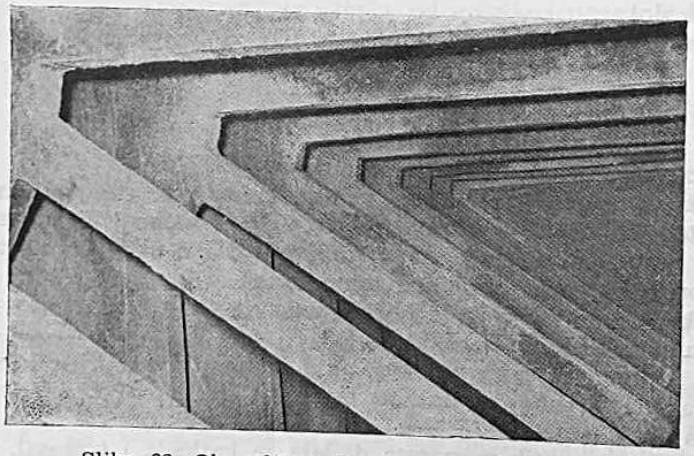
* Sigunit dobavljen od švicarske tvrtke Kaspar Winkler & Co, Zürich 48, Alstetten.

** Prolapin je dobavljen od tvrtke: Hans Hauenschild Chemische Fabrik K. Gč. Hamburg—Wandsbek 1, Holzmühlenstrasse 78.

Da se odredi dodatak vode treba prije početka torkretiranja izvršiti pokus, kojim se dodatak vode regulira. Kako je već rečeno, u aparatu za torkretiranje, kao i u gumenoj cijevi i sapnici, imademo samo suhu smjesu, koja pod pritiskom komprimirana zraka struji prema izlazu sapnice. Tek pri samom izlazu miješa se suha smjesa s vodom, i kao cementni mort štrca



Slika 21. Oštećenja okvira i sekundarnih gredica komora plivajućeg doka



Slika 22. Obnovljene površine i okviri komore

velikom brzinom na plohu koja se torkretira, Pokus se obično vrši na nekom zidu u blizini koji se neće torkretirati, a prema izgledu štrcane žbuke određuje se optimalna količina vode. Ako je nabačena žbuka masno sjajna dodatak vode je pravilan. Pojavljuju li se na površini žbuke suhe mrlje davali smo premalo vode, a ako nabačena žbuka curi, dodatak vode je prevelik.

I kod torkretiranja moramo težiti za tim da nam sastav pijeska treba što manje vode za pravilnu konzistenciju, jer i ovdje vodocementni faktor igra istu ulogu kao i kod običnog betona.

Pritisak u rezervoaru za vodu treba da je viši za 1,0...0,5 atm od pritiska u aparatu za torkretiranje, da se voda pod većim tlakom dobro miješa sa suhom smjesom na izlazu iz sapnice. Prije početka torkretiranja treba podlogu dobro prirediti i očistiti od svih prljavština, cementnog mlijeka, masnoća, boje itd. Ukoliko je na zidu otprije zaglađena cementna žbuka treba je nasjeći ili štrcanjem oštrog pijeska pod pritiskom učiniti hrapavom. Čišćenje i pripremu betonskih površina treba vršiti odozgo prema dolje, da ostrugana prljavština i otpaci padaju na još neočišćene površine.

Prije torkretiranja treba beton dobro namočiti i napiti vodom. Najbolje je početi s torkretiranjem betonskih zidova odmah nakon skidanja oplate, ali i tada pregledati površinu da li je čista i dovoljno vlažna. Ako se torkretna žbuka štrca na betonske površine podova, može se započeti torkretiranjem nakon 24...48 sati, što ovisi o stvrdnjavanju betona i temperaturnim uslovima. Čvrstoća takvog betona mora da iznosi barem 5 kp/cm².

Kvaliteta torkretne žbuke uvelike je ovisna o brzini s kojom čestice agregata i cementa udaraju o površinu koja se torkretira. Otpimalna brzina kod izlaza iz sapnice s obzirom na kvalitet žbuke iznosi 130...170 m/s, što ovisi o promjeru sapnice i udaljenosti s koje se štrca na zid.

Ako je mlaznica otvora 19 mm, otpimalna brzina iznosi 130...140 m/s, a pravilna udaljenost od zida oko 90 centimetara. Mlaznici od 32 milimetra promjera odgovara brzina od 155 do 170 m/s, a udaljenost 120 centimetara. Za normalan rad ne preporučuje se smanjivati brzinu ispod 130 m/s, jer u tom slučaju pada čvrstoća žbuke, a ni povećavati je iznad 170 m/s, jer uslijed jakog odbijanja krupnijeg zrnja uz takvu brzinu slabi sastav betona, a time i kvaliteta.

Brzina izbacivanja žbuke u ovisnosti je o tlaku komprimiranog zraka u kotlu i o dužini dovodnih cijevi, u kojima s dužinom pada pritisak.

Pritisak u kotlu treba da se kreće od 2,5 do 4,0 atm i nije ga uputno povećavati iznad 4,0 atm.

Dužini	dovodnih	cijevi	od	20 m	odgovara pritisak	od 2 atm
Dužini	dovodnih	cijevi	od	50 m	odgovara pritisak	od 2,5 atm
Dužini	dovodnih	cijevi	od	75 m	odgovara pritisak	od 3,0 atm
Dužini	dovodnih	cijevi	od	100 m	odgovara pritisak	od 3,5 atm
Dužini	dovodnih	cijevi	od	150 m	odgovara pritisak	od 4,0 atm

U normalnim uslovima rada sapnica neka je udaljena od plohe koja se torkretira 80...120 cm, i treba je držati okomito na zid, radi što boljeg utiskivanja zrnja i bolje kompaktnosti žbuke. Pri štrcanju treba sapnicu jednomjerno kružno pomicati tako da dobijemo ravnu površinu žbuke.

Sam proces formiranja sloja žbuke torkretirnajem je ovaj: žbuka koja izlazi iz mlaznice velikom brzinom udara o beton. Pri tome sitnije čestice cementa zbog manje težine udaraju slabije o plohu betona, te se prve počinju lijepiti o beton, ulazeći u sve rupice i pore betona. Krupnija zrna agregata odbijaju se od zida i padaju na pod. Tako nastaje osnovni sloj cementa debljine 1...2 mm, i taj sloj služi za formiranje prvog sloja, jer sada

se najprije sitnije a kasnije, kad sloj postane deblji, i krupnije zrnje utisku. je u njega i formira konačan izgled torkretne žbuke. U ovom stadiju otpadaka je sve manje, jer najveći dio žbuke ostaje na zidu. Gornja površina naštrcane žbuke nije potpuno ravna, ali ispupčenja i udubine ne smiju biti veća od 5 do 7 mm.

Prvi tanki cementni sloj vrlo je važan, jer on stvara dobru vezu s betonskom podlogom i povećava nepropusnost. Štrcanjem torkretne žbuke u nekoliko slojeva postiže se, uz dobar rad, čvrst spoj naslaga i jaka nepropusnost. Torkretna žbuka daleko jače i sigurnije prianja uz stari beton koji je, kako je već opisano, dobro pripremljen od obične cementne žbuke.

Debljina, broj slojeva i smjesa mora da su tačno određeni projektom, već prema namjeni koju torkretna žbuka treba da odigra. Na vertikalnim plohama torkretiranje se vrši odozdo prema gore, kako otpadni materijal ne bi onečistio još neožbukane plohe zida.

Minimalna debljina jednog sloja torkretne žbuke ne smije biti tanja od 5 do 7 mm, a maksimalna:

ako se štrca odozdo prema gore	20 mm
ako se štrca na vertikalnu plohu	25 mm
ako se štrca odozgo prema dolje (podovi)	30 mm

Ukoliko se želi dobiti slojeve deblje od gore označenih, torkretiranje se vrši u više slojeva. Drugi sloj se nabacuje nakon što je prvi vezao, dakle nakon 24 sata, ali ne duže od 48 sati po završetku radova na prvom sloju. Ovi rokovi su dani za običan portland-cement, te normalne temperaturne uslove. Ako se s drugim slojem započinje nakon 48 sati starosti treba prvi sloj pregledati da li nije onečišćen, nečistoće odstraniti, površinu ispuhati komprimiranim zrakom, te isprati i namočiti vodom. Već sam dao masene odnose cement-pijesak za različite načine torkretiranja.

Smjesa se uzima i prema svrsi kojoj treba da služi torkretni sloj, a te se smjese kreću od 350 do 750 kg portland-cementa. Klasično pravilo za nabacivanje različitih smjesa jest da mješavina prvog sloja, koja naliježe na beton, bude izrađena s nešto više cementa od količine u betonu, druga masnija od prve itd.

Ako je beton izveden sa 300 kg cementa, prvi sloj nek ima oko 400 kg, drugi 500 kg itd. To se preporučuje zato da bi smjese s kontinuiranim povećanjem količine cementa kontiniurano mijenjale i svoje module elastičnosti, čime su zajednička djelovanja zida i pojedinih slojeva žbuke i njihove deformacije također bolje usklađeni.

Ako želimo da nam torkretna žbuka štiti objekat od udara, posljednji sloj treba da bude najjači, Ako želimo nepropusnu žbuku izvodimo nepropusne slojeve, npr. prvi i drugi, a posljednji, treći sloj, treba da je tanji, samo zaštita prvih dvaju slojeva.

Aluminozni cement torkretiranjem daje znatno niže čvrstoće pa se njegova upotreba ne preporučuje, naročito ne za popravak kaverna nastalih u betonskom zidu izrađenom od portland-cementa.

U najnovije se vrijeme s mnogo uspjeha upotrebljava za torkretiranje tzv. kolgraut-koloidna žbuka, koja imade mnogo dobrih kvaliteta i daje bolje rezultate od obične torkretne žbuke. Taj postupak zove se kolgunitiranje.

Kolgruatna žbuka izrađena je u kolkret-miješalicama, gdje se rotira brzinom od 1 500 do 2 200 okr/min. Koloidna žbuka štrca se pod pritiskom, potpuno istim postupkom kao i normalna torkretna žbuka. Velika prednost kolgraut-koloidne žbuke je ta što je njena prionljivost na stari beton vrlo velika, i što pri kolgunitiranju nema mnogo gubitaka materijala koji se odbija. Gubici na materijalu iznose svega 3...5%. Tlačne čvrstoće te žbuke iznose 800...1 000 kp/cm², a skupljanja su oko polovicu manja nego normalno izrađenih žbuka. Radi toga kolgunitna žbuka dobiva mnogo manje pukotine i vrlo je nepropusna.

Sav ostali postupak oko izrade i čuvanja kolgunitne žbuke isti je kao za torkretnu žbuku.

Detaljnije o izradi kolgrautne žbuke opisano je u posebnom poglavlju o kolkret-betonu.

Torkretnu žbuku ne valja izravnavati zaribavanjem, jer time se remeti postignuta struktura komprimirane žbuke. Ako je potrebno da posljednji sloj dobije ravan izgled, treba nakon štrcanja slojeva koji daju nepropusnost torkretirati još jedan tanji sloj 6...8 mm debljine smjese sa sitnijim agregatom.

Taj sloj lagano se zariba, ali tako da se osnovni slojevi žbuke ne poremete u strukturi. Zaribavanje se vrši odmah nakon štrcanja, ili ne kasnije nego što je cement počeo vezati. Zaribavanje žbuke neka se vrši običnim alatom za žbukanje, bez upotrebe letava i ravnalice. Posljednji sloj pri izravnavanju ne prašiti cementom. Nakon završenog torkretiranja treba žbuku ostaviti da miruje. Kada žbuka dosegne čvrstoću od 25 do 30 kp/cm² može se dopustiti lagano hodanje, postavljanje oplate itd., a tek nakon sedam dana starosti može se po njoj normalno raditi. Također treba paziti da za vrijeme dok je žbuka još mlada ne bi došlo makar i indirektno do revibracije.

Vrlo je važno za kasniji kvalitet torkretne žbuke, da ju se nakon dovršenja pravilno i rigorozno čuva. Već nakon 3...10 sati, tj. nakon završetka procesa vezanja, treba početi s močenjem žbuke. Polijevanje neka je tako organizirano da žbuka bude konstantno vlažna, i da se na njoj ne pojavljuju bijele mrlje. U normalnim temperaturnim i atmosferskim okolnostima polijevanje danju treba vršiti 6 do 8 puta, a noću 3 do 4 puta.

Ako je žbuka izložena suncu ili vjetru treba je pokriti vrećama od jute, trstikom itd. koje također močimo, da zadržimo žbuku vlažnom. Kad je to moguće najbolje je žbuku potopiti u vodu i tako potopljenu ostaviti, ako smo radili s portland-cementom najmanje 14...21 dan, a ako je upotrebljen pucolan cement, oko 30 dana.

Rokovi polijevanja torkretne žbuke, ako je upotrebljen portland-cement i ako je žbuka na otvorenom, treba da iznose oko 30 dana, a ako je upotrebljen pucolan-cement oko 40...45 dana.

Žbuku treba polijevati, naročito u prvo vrijeme, raspršenim mlazom, kako se ne bi struktura žbuke oštetila pod direktnim udarcima mlaza vode. Nije dovoljno žbuku samo polijevati, već polijevanje mora da bude tako intenzivno da ona upije vodu po čitavoj debljini sloja.

Ponovno naglašujem da je polijevanje vrlo važno, jer kako je smjesa torkretne žbuke najčešće vrlo masna, tj. s mnogo cementa, i skupljanje je znatno. Uslijed toga, ako se žbuka u prvo vrijeme stvrdnjava nasuho dolazi

do velikih vlačnih naprezanja, a kao posljedica toga i do pucanja žbuke. Ako smo željeli torkretnom žbukom postići nepropusnost, tako raspucana žbuka promašila je svrhu i skupo torkretiranje izvedeno je uzalud. Radnici na gradilištu polijevanju često ne posvećuju dovoljno brige, pa je kod torkretiranja potrebno tome posvetiti naročitu pažnju i pojačati kontrolu.

Imao sam slučaj u svojoj praksi da je uslijed nedovoljnog vlaženja popucalo oko 30% torkretirane površine, što je iznosilo preko 1 000 m². Žbuku je trebalo otući i torkretiranje ponoviti, a koliki je to gubitak za poduzeće ne treba govoriti.

Svježu žbuku treba zaštititi od direktnog djelovanja jakog sunca, i od vjetra, naročito suhog. Svježu žbuku treba također štititi od jake kiše ili eventualno od udaraca valova, jer bi moglo doći do ispiranja i razrahljenja žbuke.

Kod pada temperature torkretirati se mora s najvećim oprezom. Na zamrznutu betonsku podlogu nije dopušteno štrcati torkretnu žbuku, jer je spoj smrznutog zida i žbuke slab. Čim temperatura padne ispod +5 °C nije preporučljivo nastaviti s torkretiranjem, a nabačenu žbuku treba pokrivanjem zaštiti od smrzavanja.

Ukoliko se od torkretne žbuke ne traži naročita čvrstoća, već samo nepropusnost, žbuku ne treba posebno armirati. Armiranje treba provesti ako je žbuka napregnuta na vlak, ako služi kao zaštita protiv udaraca, ili kada kroz površinu koju torkretiramo prodire voda.

Armatura se postavlja ovako: Po betonskoj površini na koju se želi štrcati žbuka treba izbušiti 5 do 6 rupa po m², dubine 5 do 10 cm. U te rupe ubetoniraju se kuke od betonskog čelika, stari željeznički čavli i slično. Na ove kuke veže se Rabitz-mreža ili čelična armatura Ø 5 mm, križno-armirana, sa 10 cm razmaka između šipki. Ukoliko statički račun ili drugi uslovi traže deblju armaturu mreže potrebno je pri torkretiranju paziti da iza šipki ne ostanu neispunjeni prostori. Da se to izbjegne treba sapnicu držati ponešto koso. Isto tako treba paziti da nabačena žbuka ne curi i ne ostavlja ispod gotove žbuke šupljine, koje na površini nisu vidljive. Također treba paziti da se materijal koji kod torkretiranja otpada ne skuplja na pojedinim mjestima uz armaturu. Taj materijal treba prije torkretiranja tih površina odstraniti, a armaturu očistiti. Smjesa slojeva žbuke ispod armature treba da je nešto plastičnija (vlažnosti 10...11%), dok za slojeve iznad mreže ta vlažnost treba da iznosi oko 9%, tj. smjesa je suša.

Ako nam kroz zid koji želimo torkretirati prodire voda, potrebno je snižavanjem vodostaja iza zida zid osušiti, i tek onda torkretirati. Ukoliko to nije moguće ugrađuju se kratke cijevi na mjestima najjačeg dotoka, i nastoji se tako koncentrirati tečenje vode samo kroz postavljene cjevčice. Oko cjevčica se torkretira. Često takav rad u potpunosti ne uspijeva, jer voda počinje prodirati i kroz torkretiranu površinu. Tada se ostavlja žbuku da otvrdne, i tek onda se ustanove sva defektna mjesta. Na ta se mjesta postavljaju daljnje cjevčice, ili se ta površina žbuka cementnim mortom, uz dodatak vodenog stakla ili kojeg drugog preparata koji povećava nepropusnost i ubrzava stvrdnjavanje. Ako to uspije torkretira se preko te žbuke. Kako sam već spomenuo, u takvim slučajevima dobro je i smjesi torkretne žbuke dodati 3...5% vodenog stakla (silikat-natrija), koje se rastopi u vodi i sipa u rezervoar za vodu. Želimo li da vezanje žbuke nastupi gotovo trenutačno, povećava se procent dodatka i preko 5%. Dodavanjem vodenog stakla žbuka postaje jako krhka, pa se radi toga nerado upotrebljava.

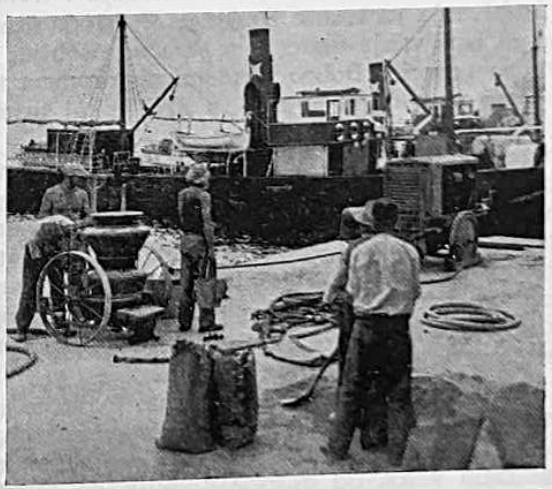
Ako je torkretiranje uspjelo ostavi se žbuka 10...12 dana da miruje, uz normalne uslove vlaženja i čuvanja. Tada se cjevčice otpile u ravnini žbuke i začepe cementnim mortom ili drvenim čepovima. Ukoliko se nakon nekoliko dana nigdje ne pojavi voda torkretira se završni sloj, kojim se prekriju i cjevčice.

Ispravljanje betonskih površina i popunjavanje nastalih rupa u betonu vrši se ovako: Manje rupe do 5 cm dubine treba dobro očistiti i isklesati sav beton koji je eventualno onečišćen od masti, ulja, algi itd. Rupa se iskleše tako da poprimi oblik krnjeg čunja. Ovakva udubljenja ne čistiti mlazom pijeska, jer je kasnije zrnca pijeska kod čišćenja teško odstraniti iz udubljenja.

Beton u rupi dobro se ovlaži i onda se udubljenje torkretira normalno u slojevima, kako je to već rečeno.

Ako su rupe dublje od 5 cm, nakon čišćenja ispune se do 5 cm od površine cementnom žbukom 1 : 3. Žbuka ne treba ni da se stvrdne, pa ako ne ispada, može se početi torkretirati na svježu žbuku. Ako žbuka ispada iz rupe treba je dok još ne veže fiksirati oplatom i tek nakon stvrdnjavanja, čišćenja i močenja torkretirati. Unutrašnjost još dubljih rupa ispunjava se betonom, a daljnji postupak je isti.

Ako su oštećenja zahvatila armaturu konstrukcije potrebno je čelične šipke prije torkretiranja očistiti od nabubrene i otpadajuće rđe, od eventualnih masti, ulja itd. Tanki slojevi rđe ne moraju se čistiti.



Slika 23. Top za torkretiranje i kompresor pri popravku operativne obale u Sušaku

Još prije rata izvršio sam torkretiranjem asanaciju armirano-betonske operativne obale u Sušaku. Beton je bio nestručno izveden, porozan i nehomogen, a čelična armatura preblizu površini, koju su morski valovi često napadali. Osim nestručne ugradbe i loše granulacije beton je rađen s normalnim portland-cementom, pa je korozija bila brza i energična.

Nakon pet godina bili su armirano-betonski dijelovi, a naročito ploča, već u takvom stanju da se morala zabraniti upotreba obale. Rđanje armature doseglo je takvu mjeru da je beton bubrio i pucao, čime se je korozija još ubrzavala. Nakon svega pet godina šipke armature Ø 20 mm mjestimice su imale debljinu još samo 5...6 mm.

Asanacija je provedena tako, da su se armirana betonska ploča i nosači otvarali s donje strane, uz odstranjivanje svih oštećenih i već odlijepljenih dijelova zaštitnog betona. Čitave šipke oštećene armature oprezno su se vadile i umetale nove, uz sve mjere opreza, uz dobro nalijeganje na ležajevima nosača i stupova uz solidne preklope, s postojećom armaturom, vezanjem itd. Na tako ojačanu i izmijenjenu armaturu štrcala se torkretna žbuka u više slojeva. Da bismo mogli izvesti dosta debeo sloj zaštitne žbuke postavljena je ispod armature Rabitz-mreža 1...1,5 cm ispod nosive armature, i izvedena su još dva sloja torkreta.

Rad je bio vrlo težak i naporan, jer se torekretiralo uglavnom odozdo prema gore, koji posao traži vješte majstore i solidan nadzor.

Tehnički prijem objekta uspio je i po rezultatima pokusnog opterećenja i po mjerenim progibima. Nadzor nad objektom i praćenje kako se konstrukcija ponaša i odupire koroziji trajao je godinama. Rezultati su bili zadovoljavajući, pa je šteta da je ta obala 1945. godine uništena, tako da je daljnje praćenje postalo nemoguće.

Ispitivanje kvaliteta torkretne žbuke vrši se najčešće tako da se po stvrdnutoj žbuci kuca čekićem i prema zvuku udaraca ocjenjuje njena prionljivost i kvalitet. Šupalj zvuk pokazuje mjesta gdje je žbuka odlijepljena od betona, ili među slojevima. Ta se mjesta označuju i treba ih ispraviti.

Kontrolna ispitivanja torkretne žbuke na čvrstoću i nepropusnost vršit će u zavodima za ispitivanje materijala stručno osoblje, pa smatram da o tome nije potrebno govoriti. Dobro izrađena nepropusna torkretna žbuka može izdržati pritisak vode od 6...8 atm, a ako je taj pritisak samo kratkotrajan, onda i oko 30 atm.

Još jedanput napominjem i upozoravam da se dobra torkretna žbuka može izraditi samo onda, ako se pedantno i stručno radi, pridržavajući se svih uputa danih za njenu izradu i njeno održavanje, odnosno čuvanje. Baš to je razlog da torkretiranje u praksi imade mnogo neprijatelja. Ako se ne torkretira s najvećom pažnjom, kvalitet torkretne žbuke naglo pada, pa se mnogo ne razlikuje od obične cementne žbuke, koja je mnogo jeftinija.

Torkretiranje je skupo i treba ga primjenjivati samo onda i tamo gdje se njegova preimućstva u potpunosti koriste.

Ako se od žbuke ne traže najviše kvalitete čvrstoće i nepropusnosti, ali ipak bolje osobine od normalne žbuke nabacivane rukom, može se dopustiti upotreba ručnih aparata za štrcanje žbuke pod pritiskom. Takovih aparata imademo različitih vrsta, od najprimitivnijih do savršenijih, pa su i rezultati različiti.

Nedvojbeno je da se ovako dobivena žbuka po svojim čvrstoćama i svojoj nepropusnosti ne može mjeriti s pravom torkretnom žbukom štrcanom topom za torkretiranje. Čvrstoća na tlak ovako štrcane žbuke iznosi 200...400 kp/cm², već prema količini i vrsti cementa. Priprema podloge, smjesa, način nabacivanja i čuvanje potpuno su isti kao i kod klasičnog torkretiranja.

Debljina slojeva kod rada s ručnim aparatima treba da bude manja nego kod torkretiranja cementnim topom, a iznosi 5...10 mm. Najbolje je da se kreće oko 7 mm.

Prionljivost te žbuke na betonsku podlogu dobra je i daleko veća od one nabačene rukom. Kod nas se taj način mnogo upotrebljava, ali trebamo znati da su kvalitet i rezultati slabiji od prave torkretne žbuke.

UPOTREBLJENA LITERATURA

Sovjetski tehnički propisi (dio XIX): *Gunitiranje.* Strojvoenmorizdat, Moskva, 1947.

D. N. Sergeev: *Remont čeličnih brodova željezobetonom.*

G. Brux: *Das Colcrete-Verfahren und seine Anwendung in Deutschland.* Zement Kalk — Gips br. 5, 1959.

INJICIRANJE

Da bismo postigli nepropusnost već stvrdnutog betona često se pribjegava injiciranju ili ubrizgavanju cementnog mlijeka u masu betona. Injiciranje se vrši kada je beton šupljikav ili porozan, dakle nedovoljno gust, ili ako je već napadnut npr. morskom vodom i ispran, pa je tako naknadno postao propustan.

Vidimo da je injiciranje metoda kojoj ćemo često pribjegavati kod pomorskih radova u betonu, npr. pri konsolidaciji obalnih zidova, suhih i plivajućih dokova i svih ostalih betonskih i armirano-betonskih objekata koji treba da imaju nepropustan beton, a uslijed pogrešne granulacije agregata, korozije betona ili eventualno nastalih pukotina nepoželjno propuštaju vodu.

Injiciranje se provodi tako da se cement pomiješan s vodom pod pritiskom ubrizgava u beton, gdje se cement taloži u šupljinicama i porama, ispunjava ih i tako beton naknadno postaje nepropustan. Upotrebljeni cement treba da je PC 350 ili viših marki, a što je finijeg mliva, to će rezultati biti bolji. Za dobar uspjeh preporučuje se da su 50% zrnaca cementa manja od 0,01 mm, a ostala da nisu veća od 0,03 mm. Ako je beton napadnut od morske vode ili će to biti u budućnosti, dobro je da je upotrebljeni cement siromašan vapnom. Ako je beton rađen od pucolanskog cementa, može se pucolanski cement upotrijebiti i za injiciranje.

Prije miješanja cementa s vodom treba cement prosijati kroz sito veličine okana 1 mm da se eliminiraju eventualni grumeni cementa, koji bi lako zabrtvili cijev pri injiciranju.

Kako ovdje razmatramo samo injiciranje mase betona, a ne i konsolidaciju terena, kad govorim o injiciranju sve će se odnositi samo na asanaciju i konsolidaciju betona.

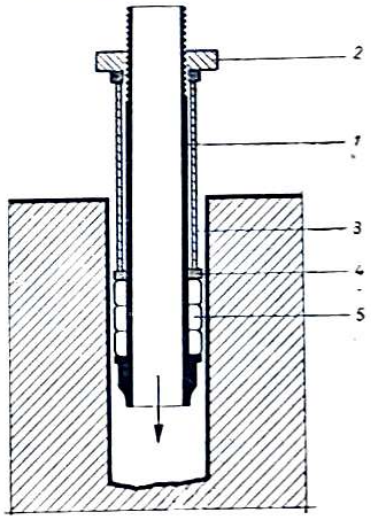
Budući da su u betonu pore, kapilare i pukotine obično vrlo sitne, za njihovo se uspješno ispunjavanje tako reći redovno upotrebljava cementno mlijeko. Ako bismo izuzetno imali veće unutarnje rupe ili široke pukotine, onda bi se mogao za ubrizgavanje upotrijebiti cementni mort.

Da bismo postigli još bolje rezultate zaptivanja pokazalo se dobrim dodavati cementnom mlijeku neke kemikalije koje još poboljšavaju rezultat i zatvaraju i one kapilare za koje su i najsitnija zrna cementa prevelika. Takvo jedno sredstvo je švicarski preparat Solpenetrit, koji se u nas već s uspjehom upotrebljavao. Solpenetrit sadrži silikate koji se vežu sa slobodnim vapnom nastalim hidratacijom, pa se time sprečava ispiranje lako topljivog vapna. Kako sam već rekao, Solpenetrit zapunjuje najsitnije kapilare koje cementom ne možemo zapuniti, pa se tako i djelovanje injekcije proširuje.

Miješanje cementa s vodom vrši se obično u niskotlačnom kotlu za injiciranje, gdje se miješanje vrši pomoću dovođenja komprimiranog zraka, koji stvara energično turbolentno miješanje rijetkog cementnog mlijeka u još otvorenom kotlu. Ipak, za ubrizgavanje cementnog mlijeka u beton najbolje je upotrijebiti koloidnu suspenziju cementa. Kako sam već rekao, upotrebljeni cement mora da bude što finijeg mliva, a miješa se s vodom u posebnim koloidnim miješalicama, kojih imade različitih tipova. Vrlo brzim mašinskim miješanjem, npr. u specijalno preudešenoj centrifugi, postižu se već dobri rezultati. Usavršene miješalice velike turbulencije, koje rade na principu turbina, vrše gibanje od 1 500 okr/min, pa dobivamo vrlo viskozne i stabilne emulzije.

Ovakve koloidne mješavine nisu više obične mješavine cementa i vode, već nastaju emulzije koje imadu stanovitu homogenost, pa ne dolazi brzo do taloženja i segregacije čestica cementa.

Prije početka injiciranja treba pomno pregledati beton koji se želi asanirati. Treba ustanoviti dimenzije presjeka, strukturu, mjestimična oštećenja itd. Ako kroz beton na nekim mjestima prodire voda, onda se za prve bušotine izabiru ta mjesta, ili ona odmah uz njih. Bušenje se vrši obično sa strojevima za bušenje i to najčešće s krunom sa čeličnim zubima ili s krunom na čeličnu sačmu. Najprikladniji profil rupa iznosi 3 do 4 cm, a u dubinu se buši otprilike u jezgru presjeka. Ukoliko je bušotina preblizu površini mora se raditi s vrlo malim pritiscima, jer postoji opasnost izbacivanja dijelova betona. Mali pritisak daje i manji radijus prodiranja cementnog mlijeka, pa se stoga nastoji s bušotinom prodrijeti više prema sredini presjeka. Razmak bušotina kreće se kod betona od 1,0 do 2,0 m, ali u stanovitim slučajevima može biti i manji. Bušotine se postavljaju u tzv. šah-mat položaj, ili kako to pokazuje konstrukcija i rezultati djelovanja ranijih injekcija. Izbušena rupa ispuše se komprimiranim zrakom i ispere vodom, a onda se u nju postavlja brtvilo kroz koje će se injicirati. Pritezanjem matice tlači se preko slobodno stojeće cijevi i prstenova na gumene prstene, koji se uslijed podužnog tlačenja šire u poprečnom smjeru, te zatvaraju slobodan presjek izbušene rupe. Dužina čitavog brtvila iznosi oko 30 cm.



Slika 24. Brtvilo u bušotini betona: 1 cijev kroz koju prolazi cementno mlijeko; 2 matica za stezanje; 3 slobodna cijev; 4 metalni prsten; 5 guma koja brtvi pri stezanju matice 2

Kotlova za injiciranje imade također više tipova. Kod nas su u upotrebi za injiciranje betona jednostavni niskotlačni kotlovi zapremine 200 do 300 l. S ovakvim strojem najbolje je raditi sa dva kotla, da bi injiciranje teklo kontinuirano. Dok se prvi kotao prazni, odnosno dok se s njim injicira, drugi kotao se puni, i obratno. Iz kotla cementno mlijeko prolazi kroz gumenu cijev do brtvila na koje je cijev priključena.

Ranije se preporučivalo najprije tlačiti gušće mješavine, koje brže ispunjaju veće šupljinice, a zatim sve rjeđe i rjeđe, koje prodiru u dalje i sitnije kapilare. Danas se pokazalo da je obratan put bolji, tj. da najprije treba ubrizgavati najrjeđu mješavinu. Počinje se s mješavinom 1 : 10 (cement : : voda), da nakon toga smanjujemo na 1 : 8 itd., a kao najgušću injiciramo mješavinu 1 : 1 i to tako dugo dok beton prima. Nakon toga ponovno uštrcavamo smjesu 1 : 10 s čime završavamo injiciranje te rupe i prelazimo na drugu.

Vrlo često susrećemo shvaćanje da će rezultat injiciranja biti bolji i sigurniji ako ubrizgavamo što gušće cementno mlijeko. To je posve pogrešno i krivo gledanje na procese koji se zbivaju pri injiciranju.

Da možemo razumjeti djelovanje cementnih injekcija trebamo najprije znati da proces vezanja cementa injiciranog cementnog mlijeka traje mnogo duže, tj. 2 do 7 dana.

Kada ubrizgavamo cementno mlijeko u masu betona čestice cementa lebde u vodi doklegod postoji tlak vode, i dok smjesa prodire kroz šupljinice betona. Uslijed trenja koje nastaje prolazom cementnog mlijeka kroz šupljinice tlak opada, i čestice cementa počinju se hvatati za hrapave strane šupljina, pa se polagano talože. Za ove već istaložene čestice hvataju se novonadošle i polako zatvaraju presjek šupljinica u betonu. Isprva se istaložene čestice cementa ponašaju kao čestice taloženog finog pijeska propusnog za vodu. Voda pod preostalim pritiskom prolazi između istaloženih čestica i gubi se u daljnjim kapilarama ili, što je vrlo čest slučaj, izlazi čista i filtrirana negdje na površini betona. Doklegod izlazi čista voda ne treba takva mjesta zatvoriti, već ih ostaviti da voda slobodno otječe. Ako se pokaže na površini cementno mlijeko u manjim količinama ono će brzo prestati teći i voda će se razbistriti, jer se dovodni kanalić sam počinje ispunjavati zrncima cementa, koja konačno zatvore prolaz daljnjim česticama cementa.

Ako je proboj cementnog mlijeka na površini betona jači zatvara se nastali otvor provizorno drvom ili krpicom, čime se smanjuje, odnosno zaustavi tok cementnog mlijeka, brzo dolazi do taloženja cementa i otjecanje prestaje.

Kako vidimo, u prvoj fazi istaloženog cementa on je propustan za vodu. Ako bismo u toj fazi pojačali pritisak, što ne bi bilo pogrešno, moglo bi se dogoditi da sav cementni talog potisnemo spram naprijed. U tom bi se slučaju nastali prazni prostor bliže brtvilu ispunio novonadošlim zrncima cementa.

Već sam rekao da je dobro kao posljednju injicirati ponovno rijetku mješavinu 1 : 10, i to pod mešto većim pritiskom od onog prethodnog. Time čestice cementa prolaze u najdalje kapilare i jače zbijaju već istaloženu smjesu.

Kada je injiciranje u nekoj rupi završeno treba zadržati tlak zasićenja najmanje 30...60 minuta, kako ne bi masa uslijed naglog pada pritiska olabavila ili počela curiti iz brtvila, ostavljajući šupljine u već injiciranom betonu. Zadržavanje pritiska može se postići i na taj način da pred brtvilom montiramo ventil kojim zatvorimo prolaz kroz brtvilo.

Istaložene čestice cementa tek nakon nekog vremena počinju da se oblažu vodenim filmom i prelaze u želatinoznu masu koja povećava svoj volumen, odnosno bubri, i u daljnjoj fazi ta masa postaje nepropusna i za vodu.

U pravilu cementno mlijeko treba ubrizgavati tako dugo dok bušotina prima mješavinu. Pri tome treba paziti da cementno mlijeko ne izlazi negdje u većim količinama, što se svakako mora spriječiti. Spremljeno cementno mlijeko mora se injicirati prije početka vezanja cementa, dakle unutar 2 do 3 sata.

Kada smo počeli injicirati jednu bušotinu ne možemo rad prekidati dok bušotina nije potpuno zasićena. Ukoliko nam se dogodilo da je moralo doći do prekida rada dulje od jedan sat, treba bušotinu otvoriti i vodom isprati već uštrcano cementno mlijeko. Kasnije, kada su zapreke uklonjene, ponovi se injiciranje ispočetka.

Ako je za vrijeme injiciranja npr. ponestalo spremljenog cementnog mlijeka pa treba čekati dok se novo ne pripremi, može se za vrijeme prekida štrcati pod tlakom u bušotinu čista voda.

2 do 3 dana nakon završetka injiciranja koje bušotine može se rupa definitivno zatvoriti. To se obično čini cementnim mortom ili gušćim cementnim mlijekom mješavine 2 : 1 do 3 : 1.

Obično se prije početka injiciranja izbuši nekoliko bušotina. Često se događa da za vrijeme injiciranja počinje izlaziti cementno mlijeko na koju od izbušenih rupa. Te se rupe onda provizorno začepe, a bilo bi dobro, ako za to postoji mogućnost, da se počne paralelno injicirati i te ostale bušotine.

Uspjeh injiciranja, tj. djelokrug djelovanja, najčešće se vidi na površini betona, koja na dijelovima dokle dopire cementno mlijeko potamni kao svaki vlažan beton. Osim toga se vidi kako radijus djelovanja postaje sve veći, jer počinje sve dalje i dalje na površini curenje cementnog mlijeka, odnosno vode. Na osnovi takve slike djelovanja injekcije odlučuje se o eventualnom umetanju novih bušotina između onih koje smo ranije predvidjeli, kako bi se obuhvatile i površine koje su ostale izvan djelovanja ranijih injekcija.

Pritisak kojim injiciramo ovisi o debljini sloja betona, odnosno dubini bušotine, gdje počinje djelovati pun pritisak. Veličina pritiska ovisi i o armiranju elementa koji se injicira. Naravno je da će konstrukcija koja je dobro prožeta armaturom izdržati veći pritisak od one koja nema armature. Osnovno je pravilo da se počinje s manjim pritiscima, npr. oko 0,5 atm, te da se pritisak za vrijeme rada povisuje. Za asanaciju betonskih konstrukcija mislim da ne treba ići s maskimalnim pritiscima na više od 1,5 do 2,0 atmosfere.

Kada je injiciranje nekog objekta završeno i kada je cement već dovoljno vezao, buše se tz. kontrolne bušotine kroz koje se ubrizgava voda i time se kontrolira efekt injiciranja. Ukoliko se pokaže da bušotina još uvijek prima vodu treba produžiti s injiciranjem i to s rijetkim mješavinama 1 : 8 do 1 : 10.

1950. g. vršena je asanacija zidova suhog doka u Puli. Betonski zidovi jako su propuštali morsku vodu jer su bili oštećeni od bombardiranja za vrijeme rata, a mjestimice i jako propusni uslijed kemijskog djelovanja i

ispiranja morskom vodom. Neke bušotine ni pod pritiscima od 2 atm nisu primale ni litru cementne mješavine, a nova bušotina izbušena samo 30 cm u stranu, primila je oko 1 600 kg cementa. Iz te jedne bušotine potpuno smo isušili i asanirali oko 80 m², a cementno mlijeko izlazilo je na spojnicama kamenih poklopnica na kruni zida, koja se nalazila 5 m iznad bušotine. Ovo sam naveo kao primjer kako ne treba odmah odustajati od injiciranja ako nam prva bušotina ne prima, te povlačiti zaključak da je beton tako gust da injiciranje ne može uspjeti. Injiciranje je ozbiljan i delikatan posao kojim mora rukovoditi iskusan stručnjak, ako se žele postići dobri rezultati.

Serioznim radom i poznavanjem tehnike injiciranje može s razmjerno malo troškova asanirati betonske objekte koji bi bez takve intervencije brzo bili uništeni.

UPOTREBLJENA LITERATURA

B. Rajčević: *Injektiranje.*

G. Brux: *Das Colcrete-Verfahren und seine Anwendung in Deutchland.* Zement — Kalk — Gips, br. 5, 1959.

A. N. Adamovič i D. V. Koltunov: *Injektiranje podloga hidrotehničkih objekata.*

A. Guttmann: *Chemische Verfestigung und Abdichtung undichten Mauerwercks und Betons.*

E. Maag: *Injektionen mit Kolloid — Zement.*

BETONIRANJE POD MOREM

Danas je osnovno pravilo za betoniranje pod morem da svjež beton ne dolazi u direktan kontakt s morem. Utvrđeno je naime da morska voda najjače napada beton dok je još svjež, odnosno mlad. O tom problemu govorit ću podrobnije kasnije. Držeći se tog osnovnog pravila moramo mnoge načine ugrađivanja koji su se u nas donedavna vršili, a gdjegdje se još uvijek pojavljuju, potpuno odbaciti, ili ih dopustiti samo kod privremenih ili najskromnijih nevažnih objekata.

a) Direktno bacanje svježeg betona u more uopće se ne može dopustiti ni za kakav rad u moru. Čim svjež beton dođe u more veće i teže kamenje propada brže, pijesak polaganije, a najsitnije čestice i cement talože se posljednje, ukoliko ih morske struje ne odnesu na drugo mjesto. Beton se odmah raščlanio na svoje sastojke i ne djeluje više kao beton, a cement koji se taložio na površini ili biva ispran ili ostaje kao muljevita kora na površini.

b) Spuštanje betona pod more specijalnim sanducima (bajama) koji su udešeni tako da se mogu na dnu izvrtati, ili pak imaju dno koje se otvara te tako beton donose na mjesto betoniranja, također ne zadovoljava. Svjež beton podvrgnut je odmah djelovanju mora, beton je slabe kvalitete i nije homogen. Iako se u nas još uvijek susreće takav način ugrađivanja moramo ga otkloniti osim, kako sam rekao, kod provizorija ili malih, skromnih i jeftinih objekata. Betoniranje s vrećama punjenim betonom, koje se na dnu otvaraju i ispražnjuju, još je primitivniji način od rada sa sanducima i treba ga odbaciti.

c) Betoniranje pomičnim lijevkom. Iznad oplate treba izraditi pokretnu platformu s tračnicama po kojima se kreće vagonet, ili pokretna dizalica, s pričvršćenom pomičnom cijevi. Betonira se najprije u poprečnom smjeru, pojas do pojasa. Drugi sloj dobro je betonirati u pojasima okomitim na smjer prethodnog sloja, tj. podužno, da se izbjegne poklapanje reški. Prije početka betoniranja puni se cijev betonom pomoću sanduka ili vreća za betoniranje. Kada je cijev puna betona malo se podigne, i beton na njenom donjem dijelu počinje izlaziti. Cijev se polako pomiče i paralelno puni novim betonom, tako da je uvijek puna betona do iznad površine vode. Lije-

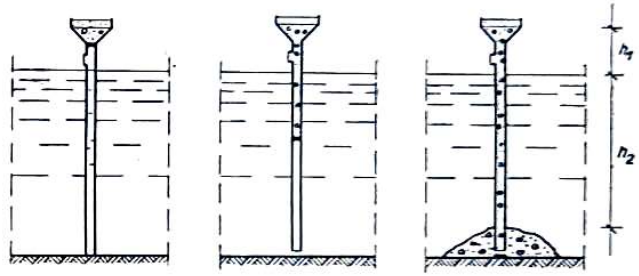
vak donjim krajem seže uvijek do blizu gornje površine već nasutog betona. Ni ovakav način ugrađivanja nije preporučljiv za radove u moru, jer svježi beton dolazi u dodir s morskom vodom. Na površini slojeva taloži se sloj cementa i mulja, ukoliko se ne radi vrlo brzo i samo u jednom sloju, gdje bi se taj sloj mogao odstraniti. Beton nije homogen, nije otporan, a prema tome najčešće nije ni trajan, pa se za radove u moru ne preporučuje.

d) Budući da se danas sistem kontraktora i sistem betona s prvotno ugrađenim agregatom i naknadnim unošenjem cementnog morta (prepakt, kolkret) smatraju najboljim načinima, koji daju najkvalitetniji beton pod morem, s ta ću se dva načina ugrađivanja pozabaviti u posebnim poglavljima.

UGRAĐIVANJE KONTRAKTOROM

Betoniranje kontraktorom ili pomoću vertikalnih pomičnih cijevi rješava problem betoniranja pod vodom, a da svježi beton ne dolazi u direktan kontakt s vodom, odnosno morem.

Osnovni je princip betoniranja kontraktorom da svježi beton ulazi u masu već prije postavljenog betona, a taj prvopoloženi beton štiti do kraja betoniranja svježi beton od direktnog dodira s morem i mogućnošću ispiranja.



Slika 25

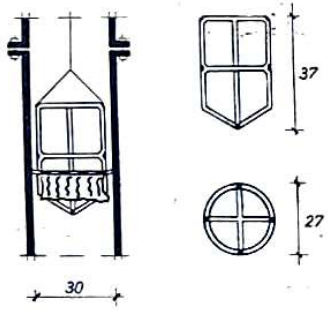
Kontraktorska cijev izrađena je od lima, okrugla je presjeka, unutarnjeg dijametra 25...35 cm. Čitava cijev, dužine prema potrebi, sastoji se od više spojenih komada; dužina donjih cijevi je 2 m, a gornjih 1 m. Cijevi su međusobno spojene na peleš, a između obruba postavlja se gumeni prsten koji se steže zavrtnjima, da spoj bude nepropustan za vodu. S gornje strane na cijev se nastavlja lijevak, koji se puni betonom. Na donjem kraju lijevka montiran je poklopac sa šarnirom, koji se otvara prema dole. Poklopac u zatvorenu položaju pričvršćen je čeličnim užetom fiksiranim iznad lijevka. Prije prvog punjenja zatvorimo lijevak poklopcem i postavimo na dno lijevka »čep« od jute. Na jutu nabacamo beton do vrha lijevka. Cijev podignemo 2...8 cm te otpuštanjem čeličnog užeta pustimo da poklopac padne i otvori prolaz betonu i čepu kroz cijev. Lijevak odmah punimo novim betonom, a cijev ponovno spustimo do dna, kako beton u cijevi ne bi pao niže od razine vode. Lijevak kontinuirano dalje punimo betonom, tako da je cijev za čitavo vrijeme betoniranja uvijek puna.

Umjesto opisanog načina možemo početak betoniranja provesti i na drugi sličan način. U cijev spustimo čep u obliku košare izrađene od okruglog željeza, prema skici. Na dnu košare postavi se jutena vreća i krovna

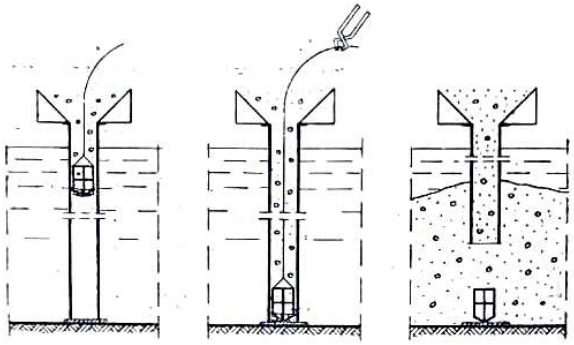
ljepenka, što brtvi čep u cijevi. Sama košara obješena je na žici. Sipanjem betona na ljepenku košara se polako spušta pod težinom nasutog betona. Cijev je podignuta od dna oko 10 cm, i voda na donjoj strani izlazi iz cijevi, a beton ispunja čitavu cijev. Žica na kojoj visi košara gore se odsiječe, a košara ostaje u betonu na dnu jame. Cijev ponovno podignemo za nekoliko centimetara i pustimo da se beton razlijeva po dnu oko cijevi. Kada se beton oko cijevi povisio za oko 1,0 m više ne prijeti opasnost od prodiranja vode u cijev. Dovođenjem novog betona stvara se oko cijevi humak betona koji se širi u zavisnosti od radijusa djelovanja kontraktorske cijevi. Prve mješavine betona treba izraditi masnije smjese, sa oko 600 kg cementa na m³ betona. Poprečna brzina dizanja betona iznosi oko 15 cm na sat.

Beton u cijevi kontraktora teče neprekidno, a cijev sa svojim donjim krajem mora da bude neprestano uronjena u masu betona. Kako se masa betona, koja je izašla iz cijevi povisuje i širi, tako treba cijev postepeno dizati. Uron cijevi pri kasnijem radu veći je od onog u početku, a ovisi o radijusu djelovanja. Pri radijusu od oko 4 m uron cijevi treba da iznosi oko 1,5...1,8 m, a pri radijusu od 3 m 0,9...1,2 m.

Radijus djelovanja, vidimo, iznosi 3...4 m, što znači da s jednom cijevi možemo betonirati površinu od oko 30 m². Ukoliko je površina bloka koji se betonira veća najbolje je raditi sa dva ili više kontraktora, i nastojati da svi rade paralelno, te da se beton jednakomjerno diže ispod svih cijevi. Ako to nije moguće treba blok provizornim oplatama podijeliti u polja tolike veličine da jedna kontraktorska cijev poslužuje tako ograničeno polje. Na provizornu oplatu pribija se jedna ili više horizontalnih trobridnih pri-



Slika 26. Košara izrađena od betonskog čelika



Slika 27

zmi, već prema visini betoniranja. Time na betonu dobivamo utor, i bolju vezu susjednog bloka sa prvo betoniranim.

U normalnom radu s jednom cijevi treba izbetonirati sloj od minimum 30 cm, što znači da za jedan sat možemo ugraditi 12...18 m³ betona. Ovaj podatak važan je za pravilno određivanje količina cementa i agregata, te za dimenzioniranje kapaciteta miješalice i transportnih sredstava, jer rad s kontraktorom mora da bude neprekidan, a ako ustreba i danonoćan.

Betonira se odjednom do visine koja je dana projektom ili nešto više, jer najgornji se sloj debljine 30...50 cm često skida kao loš. Najgornji sloj

je onaj beton koji se prvi spustio u more, te koji je za čitavo vrijeme betoniranja, još svjež, bio u direktnom dodiru s morem, pa je osim korozivnog napadanja bio izložen i ispiranju. Taj sloj nikada ne doseže kvalitet ostalog betona, pa ga je najbolje skinuti.

Ukoliko su stranice građevne jame izvedene nepropusno, npr. kod gradnje suhog doka, može se dno betonirati kontraktorom pod vodom do potrebne visine, što nam omogućuje da iscrpemo vodu i dalje radimo u suhu. U ovakvim slučajevima treba voditi računa i o uzgonu, a ne samo o dovoljnoj debljini koja osigurava nepropusnost. I tu se preporučuje skidanje lošeg najgornjeg sloja prije nastavljanja betoniranja na suhu. Gornja površina izbetoniranog bloka kontraktorom obično je zaobljena, s padom prema krajevima od 10%.

Kut pokosa betona u većim dubinama iznosi oko 50°, a jedan metar ispod površine vode smanjuje se na 30°.

Ako smo blok koji betoniramo razdijelili poprečnim oplatama u više manjih blokova, a radimo jednim kontraktorom, nakon završetka betoniranja manjeg bloka treba paziti kada možemo skinuti provizornu oplatu, odnosno kada možemo nastaviti betonirati blok uz taj zabetonirani. Beton prvog bloka mora da bude već toliko očvrsnuo da se pri skidanju oplate ne bi rasuo ili proširio u poprečnom smjeru, ukoliko beton još nije dovoljno čvrst da podnese opterećenje gornjih slojeva.

Prema našim PTP za pomorske radove oplata se može skidati po isteku četiri dana nakon betoniranja. Ovaj rok treba svakako provjeriti, pa ako beton još nije dovoljno stvrdnuo treba ga produžiti. O tome treba naročito voditi računa ako radimo s pucolanskim cementom, za koji znamo da u prvo vrijeme sporije stvrdnjava. Oplatu treba izrađivati od blanjanih dasaka sa spojevima koji hermetički zatvaraju, a mora da bude dimenzionirana tako da može izdržati pritisak svježeg betona od 1,8 do 2,0 Mp/m². Intenzitet pritiska na većoj dubini od 1,5 do 2,0 m ostaje konstantan, kako je gore dan. Krivulja pritiska, koja ovisi o sastavu i konzistenciji betona, brzini ugrađivanja itd., još uvijek nije definitivno utvrđena. Ako se cijev za vrijeme rada zabrtvi, dobro je beton u njoj malo provibrirati vibratorom. Beton koji se zgrušao, vibriranjem postaje opet tekuć i tečenje betona kroz cijev nastavlja se normalno. Budući da do takvog zastoja dolazi dosta često, a vrlo je neugodan pri radu, vibrator treba da je pripremljen u blizini rada s kontraktorom.

Kada cijev podizanjem dosegne visinu od oko 1 m iznad početne visine, skine se njen najgornji dio od 1,0 m, postavi ponovno lijevak i radi normalno dalje. Skidanje cijevi treba da se obavi brzo, kako ne bi došlo do skrućivanja betona u njoj. Konzistencija betona treba da je takva da glatko prolazi kroz cijev, a brzina kod izlaza tolika da se beton rasprostre po čitavoj površini koju betoniramo. Smjesa betona mora da bude takova da slijeganje konusa iznosi 14...18 cm, ili rasprostiranje prema ranijem opisu oko 50 cm. Ako beton počne prebrzo izlaziti iz cijevi treba je odmah uroniti dublje u beton.

Prema našim PTP za pomorske radove dodatak vode za izradu ovakvog betona iznosi 10...14% težine suhe smjese. S dodatkom vode može se ići i do 8 težinskih procenata, ako je agregat dobro izabran.

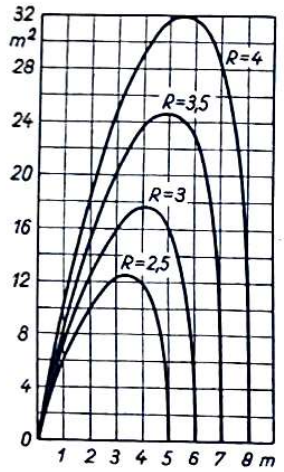
Radi bolje ugradljivosti betona, tj. da lakše teče kroz cijev, dobro je smjesi dodati koji plastifikator. Preporučujem bentonit, jer se može dobaviti i kod nas.

Naši propisi za pomorske radove preporučuju dodatak od 25 kg gašena vapna u vidu mlijeka, na m³ betona, u cilju povećanja plastičnosti smjese.

Vapno je doduše plastifikator, ali se ono ne može upotrijebiti u podmorskim radovima. O tome sam već govorio u poglavlju o pucolanu, a biti će još govora u poglavlju o kemijskom utjecaju morske vode na beton. Danas se to smatra štetnim i ne preporučuje se.

Kao agregat treba uzeti zaobljen šljunak, jer tucanik daje previše krut beton koji stvara veliko trenje o stijene cijevi, pa je tečenje otežano. Količina pijeska treba da bude povećana, mora da iznosi 40...50% od ukupne težine ispune. Preporučuje se s granulometrijskim sastavom približiti se *E* liniji njemačkih propisa.

Prema iskustvu, brzina kretanja betona u cijevi treba da iznosi 0,1.. 0,15 m/s, uz pravilan rad kontraktora.



Slika 28

Iznosim grafikon prema ruskim iskustvima, koji određuje površinu bloka koja se betonira iz jedne kontraktorske cijevi, ako su dani širina bloka i radijus djelovanja. Na ordinati se očitava površina koja se može uspješno betonirati.

Kako sam gore rekao, beton u cijevi mora da se kreće određenom brzinom koja nastaje od natpritiska visine stupca betonske smjese. Taj pritisak na dnu cijevi, za radijus djelovanja od 4 m, treba da iznosi oko 2,5 kp/cm², a za radijus od 3 m ne manje od 1 kp/cm². Veličina natpritiska može se izračunati prema jednadžbi

$$P = 0{,}25\ h_1 + 0{,}15\ h_2$$

gdje je:

h_1 = visina cijevi iznad površine vode

h_2 = dubina vode iznad površine betona

Računsko nadvišenje cijevi iznad površine vode određuje se jednadžbom

$$h_1 = (3 \text{ do } 6 \text{ m}) - 0{,}6\ h_2$$

Izbor veličine (3 do 6 m) odabire se u zavisnosti od radijusa djelovanja kontraktora.

Prema mojim proračunima i provjeravanjima rezultata na gradilištu došao sam do zaključka da za postizavanje natpritiska na dnu od 1,0 kp/cm² treba da je ukupna dužina cijevi 5...6 m.

Prema tome, ako bi dubina mora iznosila oko 2 m, trebali bismo imati cijev 3...4 m iznad vode, da postignemo potreban nadpritisak u betonu na dnu cijevi, te da se beton uslijed toga normalno rasprostire. Pri dubini vode od 5 m dovoljno je da cijev bude iznad vode 1 m. Ako je dubina mora još veća postići ćemo veće pritiske većom visinom stupca betona. Kod ukupne visine

cijevi od 9 do 11 m iznosit će natpritisak na dnu 2 do 2,5 kp/cm², već prema odnosu dubine vode i visine cijevi iznad vode.

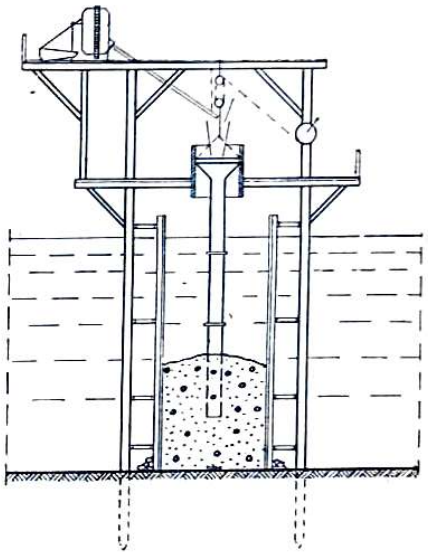
Ove rezultate treba još provjeriti, jer postoje i drugi faktori, osim visine stupca betona, koji utječu na veličinu pritiska na dnu, kao što su trenje betona, odnosno sastav i vrst agregata itd. Rezultati međutim ukazuju mlađim kolegama put kojim treba krenuti dalje da se betoniranje kontraktorom postavi na stručnu osnovu, pa onda ni rezultati neće izostati.

Pravilnim postupkom kod betoniranja kontraktorom dobiva se beton po kvaliteti jednak normalnom betonu.

Visina cijevi iznad vode određuje se prema lokalnim visinskim prilikama, očekivanoj mirnoći površine mora da ne bi došlo do zalijevanja valova preko otvora lijevka, te o postizavanju potrebnog natpritiska.

Najveća dubina u kojoj se može betonirati sistemom kontraktorskih cijevi iznosi 20 m.

Pri radu kontraktorom na gradilištu mora stalno da bude prisutan ronilac koji kontrolira stanje oplate, zabrtvljuje eventualna mjesta gdje izlazi beton ili cementno mlijeko itd.



Slika 29

Za pravilan rad kontraktorom, naročito ako se ugrađuju velike kubature betona, potrebno je imati jake uređaje za sigurno i brzo podizanje cijevi. Nadalje je potrebno imati osigurane depoe agregata i cementa, te dobro organiziranu betonijerku s prostudiranim i sigurnim transportom od miješalice ili bunkera do mjesta rada. Za samo betoniranje kontraktorom, tj. za rad, treba računati sa 3...7 sati za m³ ugrađena betona.

UPOTREBLJENA LITERATURA

J. Suchy: *Unterwasserschüttbeton nach dem Contractorverfahren.* Bauplanung und Bautechnik, mart, 1954.

Trier und Tode: *Unterwassergussbeton nach dem Contractor-verfahren.*

Brennecke—Lohmeyr: *Grundbau,* Bd. III.

M. Benzel: *Grundbau.*

Voronov: *Morskie sooruženiy iz betona i železobetona,* Moskva, 1950.

PREPAKT- ODNOSNO KOLKRET-METODA IZRADE BETONA

Osnovni princip obiju metoda isti je, naime da se najprije ugrađuje krupni kameni agregat, a nakon toga se šupljine između agregata ispunjavaju cementnim mortom. Tako dobiven beton u stvari je diskontinuaian, ali uz pravilnu izradu, naročito kod podmorskog betoniranja, ima značajne prednosti čak i pred betoniranjem kontraktorom.

Prema podacima koje sam mogao sakupiti u literaturi prvi su prepakt-metodu primijenili 1934. g. u Engleskoj inženjeri Morgan, Pickersgill i Gamon. U Americi Raymond Davis sa suradnicima primjenjuje 1938. g. prepakt-metodu kod asanacije željezničkog tunela na pruzi Santa Fe kod Pittsburga u Kaliforniji. Nijemci prvi puta primjenjuju tu metodu tek 1954. g. pod imenom kolkret (Colcrete).

Danas ta metoda sve više prodire u građevinarstvo, a s uspjehom se primjenjivala posljednjih godina u USA, Kanadi, SSSR-u, Francuskoj, Engleskoj, Belgiji, Indiji, Africi itd.

Kod nas je, koliko mi je poznato, prije nekoliko godina izvršena asanacija obalnih zidova Ljubljanice u Ljubljani, te asanacija bazena tvornice Arrigoni u Izoli prepakt-metodom, a izveo je Zavod za raziskavo materijala in konstrukcij SR Slovenije Ljubljana, i to s uspjehom.

Primjena prepakt — ili kolkret-metode vrlo je široka: za masivne građevine, u pomorstvu i hidrogradnji uopće, kod gradnje cesta, velikih temelja za strojeve, kod mostova itd.

Ovdje ću uglavnom razmatrati primjenu tih metoda na pomorske radove, u želji da ta nova metoda dobije svoje mjesto u našem građevinarstvu, koristeći sve njene dobre strane kod radova u vodi.

Američki način izrade prepakt-betona sastoji se u ovome: Najprije se grubim kamenim agregatom puni prostor između oplata. Veličina grubog agregata ovisi o veličini presjeka objekta koji se betonira, može dakle biti svake prikladne veličine.

Kod velikih masa betona, tj. velikih presjeka, minimalne dimenzije grubog agregata neka su 16 mm, a kod manjih presjeka ne ispod 10—12 mm. Teoretski oblik zrna grubog agregata ne igra ulogu, i mogli bi se upotrijebiti i dugoljasti ili plosnati komadi. Za klasičan beton, zbog slabe obradivosti i potrebe veće količine vode, takav agregat nije preporučljiv.

U praksi međutim treba voditi računa o količini utroška najskupljeg materijala na m³ prepakt-betona, a da pri tome dobijemo tražene kvalitete betona. S tog gledišta oblik zrna igra važnu ulogu, jer treba upotrijebiti agregat takvog oblika da šupljine između zrna budu što manjeg ukupnog volumena. Ukupni volumen šupljina kreće se od 33 do 45%. Najmanji je

volumen šupljina kod okruglog i zaobljenog šljunka glatkih površina i većih komada, a veći je procent kod loše graduiranog sitnijeg drobljenca. Mort kojim se ispunjavaju šupljine između krpunog agregata prepakt-betona sastoji se od portland-cementa, pucolana, pijeska, te male količine nekog intruzivnog materijala, kao aeransa i vode.

Kod radova u moru upotrebljeni portland-cement treba da odgovara takvim radovima, tj. mora da bude siromašan na C_3A (od 5...8%) i da ne sadrži previše C_3S (40...50%).

Pucolan treba izabrati vrlo finoga mliva, i onakav koji za miješanje ne traži veliku količinu vode. Najčešće se upotrebljava lebdeći pepeo, s niskim sadržajem ugljena. Dodani pucolan povećava obradivost i ugradivost svježeg morta, te pridonosi većoj otpornosti i nepropusnosti prepakt-betona, naročito veće starosti. Intruzivno sredstvo dodaje se prepakt-mortu obično u količini od 1% težine cementa i pucolana.

U Americi se najčešće upotrebljava vrlo fino mljeven aluminij, koji je podvrgnut naročitom postupku. Prah aluminija djeluje s oslobođenim alkalijama, tj. vapnom cementa, za vrijeme rane hidratacije i stvara bezbroj sitnih mjehurića hidrogenskog plina prije stvrdnjavanja morta.

Umjesto aluminijeve prašine može se upotrijebiti i druge aeransе. Dodatkom takva sredstva umanjuje se dodatak vode, povećava obradivost i ugradivost, te žitkost morta, usporava se rano vezanje i stvrdnjavanje, pridonosi se tome da čestice lebde duže u suspenziji, povećava se nepropusnost i otpornost protiv smrzavanja i otkravljivanja betona, a stvara se i stanovita ekspanzija koja pomaže boljem prianjanju morta za agregat.

Pijesak koji se upotrebljava za prepakt-mort mora da prolazi kroz sito veličine otvora 1,2 mm, a znatan procent i kroz sito s oknima $d = 0{,}15$ milimetara.

Mješavina morta određuje se prema željenim čvrstoćama i ostalim karakteristikama betona. Prema američkim iskustvima maseni omjeri tih mješavina kretali su se od 9 : 1 : 6 = cement : pucolan : pijesak do 1 : : 1,6 : 5. Prva bogatija mješavina dala je tlačnu čvrstoću nakon 1 godine starosti 844 kp/cm², dok ona mršavija 175 kp/cm².

Omjer smjese najčešće se utvrđuje pokusima, jer treba nastojati da se dobije odgovarajući mort s minimalnom količinom potrebne vode. Mort treba da je gustoće kreme u kojoj krute čestice lebde u suspenziji i treba da zadrži tu svoju pokretnost kroz nekoliko sati. Kada smo izabrali grubi agregat najbolje je na samom gradilištu odrediti procent šupljina.

U neki priređeni i izmjereni bazen sipamo agregat do vrha i poravnavamo ga. Nakon toga sipamo vodu koja ispunjava sve šupljine, i pri tome je mjerimo. Iz podatka o volumenu bazena i količini vode koju smo usuli izračunamo procent šupljina u agregatu.

Za izradu 1 m³ prepakt-betona potrebno je 1 m³ grubog agregata. Mort se ne smije lijevati odozgo u šupljine, da teče prama dolje. Prepakt-postupak je obrnut: mort se uvijek tlači u posebne, već ranije uronjene cijevi na najnižem mjestu, pa ispunjavajući okolne šupljine najprije se širi, a onda diže, gurajući pred sobom zrak i eventualnu vodu. Lijevanje se vrši tako dugo dok se na površini ne pokaže nerazrijeđen mort. S podizanjem nivoa morta postepeno se izvlače cijevi, ali tako da su uvijek malo uronjene u mort. Daljnjom primjenom počelo se vibrirati mort koji time postaje teč-

niji, a može se štediti i s dodatnom vodom. Pri tome treba izabrati vibratore visoke frekvencije, da bi sitne čestice došle u gibanje, te da mort postane tečan. Vibratore se obično pričvrsti za cijevi kroz koje se utiskuje mort.

Dva vrlo važna svojstva prepakt-betona su da mu je skupljanje za vrijeme sušenja malo, te da dobro prianja uz stari beton. Mnogi su pokusi pokazali da mu je skupljanje 1/2...1/3 skupljanja klasičnog betona. To se tumači tako što kod prepakt-betona zrna krupnog agregata ne plivaju u mortu već stvaraju skelet, u kom su zrna u međusobnom kontaktu. Sile skupljanja koje se stvaraju u pojedinim šupljinama ne mogu se sumirati, jer kameni skelet ne dopušta veće skupljanje, i te sile preuzima na sebe. Budući da je skupljanje malo, kako je to već rečeno, a kako se mort pod pritiskom ugrađuje, prepakt-beton vrlo dobro prianja uz stari, očišćeni beton, pa se zbog toga mnogo upotrebljava pri asanaciji oštećenog betona.

Što se tiče tlačnih čvrstoća prepakt-beton u prvo vrijeme imade manje čvrstoće od klasičnog betona, ali već nakon 90 dana on dostiže te čvrstoće, a često ih i prelazi. To zakašnjelo očvršćenje tumači se dodatkom pucolana prepakt-mortu, o čemu je već ranije govoreno. Prepakt-beton postaje sa starošću vrlo nepropustan, što se također pripisuje poznatim svojstvima pucolana.

L'Hermite u svojoj raspravi *O nekim općim pojmovima tehnologije betona* ovako gleda na zbivanja i problematiku prepakt-betona. Prionljivost prepakt-morta i zrna agregata manja je nego klasičnog betona. To tumači time što su zrna agregata često ostala prašnjava ili obavijena filmom površinske vode, što oboje umanjuje prionljivost s cementnim mortom. Ovu slabiju prionljivost djelomično se nadoknađuje dodavanjem aeransa koji stvarajući mjehuriće zraka ili plina povećavaju volumen i stvaraju ekspanziju i pritisak na čvrsta zrna agregata, čime povećavaju i prionljivost.

Razmotrimo sada zbivanja koja nastaju u koncentriranim cementnim suspenzijama. Ako učinimo mješavinu mineralnog praha i vode potrebno je da čestice budu odmah dobro namočene i filmovima razdijeljene jedne od drugih. Ovakva mješavina ne mora biti stabilna, jer postoje tz. elektrostatičke Van der Waalsove sile koje nastoje da se čestice privuku. Ove elektrostatičke sile suprotstavljaju se silama atrakcije. Ako nema sila atrakcije nema ni unutarnjeg trenja, i mješavina se vlada kao tekućina. No čim takva mješavina dođe u stanje mirovanja, uslijed sile teže dolazi do segregacije, tj. na dnu se talože čestice prašine, a u gornjim dijelovima imamo vodu. Ako sile atrakcije djeluju dolazi do flokulacije, jer se čestice skupljaju u obliku pahuljica. Do toga dolazi čim čestice cementa dođu u dodir s vodom, i kad počinje hidratacija. U koncentriranim suspenzijama ovako nastale pahuljice stvaraju neki mikroskelet koji daje otpor trenju i mješavina postaje plastična. Flokulacija smanjuje brzinu taloženja i mješavina više ne teče. Izrada aktivnog cementnog morta bazira se na fizikalno-kemijskim, odnosno mehaničkim djelovanjima, pri čemu dolazi do mijenjanja stupnja flokulacije.

Od prepakt-morta se traži da bude tekuć, da ga se može utiskivati pod pritiskom kroz cijevi, i da njegov otpor na smicanje bude što manji, kako bi se lakše vršilo injiciranje i prodiranje morta u šupljine agregata. Čim je mort ugrađen on ne smije segregirati i mora brzo da postane krut. Mort mora da ima svojstva tekućine dok je u gibanju, i da brzo stvrdne čim je ispunio šupljine između agregata, gdje poprima svoj definitivan oblik i položaj. Ova L'Hermitova tumačenja zbivanja u prepakt-mortu naveo sam jer smatram da nam u mnogome rasvetljavaju pojave koje su odlučujuće za izradu dobrog prepakt-betona. Prepakt-metoda patentirana je u Americi 1943.

U Njemačkoj se taj postupak razvio pod nazivom kolkret-metoda, koja se bazira na mehaničkom aktiviranju tzv. kolgraut (Colgrout)-morta Svi strojevi i uređaji za izradu kolkret-betona također su patentirani, pa se za rad po toj metodi mora imati licencija.

Koloidni mort kolgraut izrađuje se u specijalnim kolkret-miješalicama u kojima se najprije miješa voda i cement, a kasnije se dodaje i pijesak. Brzina miješanja iznosi 1 500...2 200 okr/min. Uslijed tih velikih brzina rotacije dolazi do rastavljanja čestica i flokulacija ne može nastati za vrijeme kretanja. Za vrijeme kretanja počinje međutim hidratacija čestica cementa i dolazi do stvaranja gelnih supstancija na površini, koje se za vrtnje odvajaju i suspendiraju u vodi. Kada se suspenzija smiri, ti vrlo fini suspendirani kristali stvaraju koloid koji usporava flokulaciju. Uslijed stvorenih velikih smičućih sila trenja za vrijeme vrtnje i gore opisanog stvaranja gelnog produkta dolazi do stabilne disperzije do početka vezanja morta, tj. dok mort ne zauzme svoj definitivan položaj. Ovako dobiveni koloidni mort ne miješa se s vanjskom vodom, pa se s njim može raditi po kiši i u vodi.

Žitkost kolgraut-morta ovisi o mnogo faktora, o veličini i obliku zrnaca pijeska, o njegovoj specifičnoj težini, vlažnosti pijeska, količini vode, količini, vrsti i mlivu cementa itd., te o brzini i trajanju miješanja. Veća količina finijeg pijeska ima veću površinu pa veže veću količinu vode, te pri istom V/c faktoru povećava viskozitet, odnosno smanjuje sposobnost tečenja.

Vodocementni faktor kreće se kod kolgrauta od 0,45 do 0,80, pri čemu treba uzeti u obzir i vlastitu vlažnost pijeska. Za ovaj način rada vrlo je važno da se određena količina vode strogo kontrolira, jer višak vode suprotstavlja se stvaranju koloida, što može imati neugodne posljedice na kvalitet morta.

Orijentacione mješavine kolgraut-morta

Tablica 20

Cement u kg	Suh pijesak u kg	Voda + vlaga pijeska u l	Upotreba
50	75	do 31,8	za radove u vodi
50	100	do 36,4	za radove u vodi
50	150	do 45,5	za masivni beton

Gornje granice vodocementnog faktora za različite mješavine bile bi ove:

Mješavina	Faktor V/c
1:1	0,50...0,59
1:1,5	0,55...0,63
1:2	0,60...0,70
za podvodni beton:	
1:3	1,0
1:5	1,3

Pri određivanju v/c faktora uvijek treba uzimati u račun i vlastitu vlažnost pijeska.

Bez obzira na gore dane veličine v/c faktora, na gradilištu treba uvijek izvršiti ispitivanja da se tačno odredi kako bi se sa što manje vode dobio tako židak mort da dobro zapuni sve šupljine agregata.

Portland-cement može se upotrijebiti od PC 250 do PC 450, već prema čvrstoćama koje se želi postići. Ukoliko se radi u moru, sastav portland-cementa mora da odgovara upotrebi za podmorske radove, a tada dobro je dodavati pucolana ili lebdećeg pepela.

Razumljivo je da se za radove u moru mogu upotrijebiti i svi drugi cementi otporni na morsku vodu, kao portlan-cementi s dodatkom zgure, metalurški, supersulfatni itd.

Pijesak za kolgraut-mort dobro je da slijedi *B*-liniju njemačkih propisa, a najsitnijih čestica da nema više od 10%.

Veličina zrnaca kreće se od 0 do 3 mm ili od 0 do 5 mm, već prema namjeni morta i veličini šupljina. Pri izboru pijeska od 0 do 1,5 mm modul finoće treba da se kreće od 1,2 do 2,0, a za pijesak od 0 do 5 mm do 3,5.

Modul finoće dobijemo zbrajanjem kumulativnih procenata ostatka na svakom situ, i taj zbroj dijelimo sa 100. Modul finoće empirijski je faktor, koji daje mjerilo finoće ili krupnoće gradacije agregata. Gradacija agregata izražava se u težinskim procentima ostataka na seriji sita, koji se zbrajaju sa svakim narednim sitom.

Grubi kameni agregat kolkret-betona obično se upotrebljava minimalne veličine $d = 40$ mm, a katkada se ide i do $d = 35$ mm.

Chefdeville navodi u svom članku citiranom na kraju ovog poglavlja interesantan odnos veličina najmanjeg zrna šljunka naprama najvećem zrnu pijeska, naime da je najpovoljniji omjer ako je najmanje zrno šljunka veće od osmerostrukog promjera najvećeg zrna pijeska.

Ako su zrna pijeska veličine npr. do 5 mm, šljunak treba da bude veličine 5x8 = 40 mm.

Najbolji je zaobljen šljunak kuglasta oblika radi lakše i bolje ugradbe kolgrauta. Drobljenac je već nepodesniji, i povećava procent šupljina, a to poskupljuje kolkret-beton, jer je kolgraut-mort najskuplji dio kolkret betona. Budući da pločasti i dugoljasti agregat još povećava utrošak morta, a i otežava ugradbu, Nijemci ga ne preporučuju za upotrebu. Pri upotrebi šljunka veličine 40...60 mm za agregat, šupljine iznose do 40%, a ako je šljunak 50...75 mm, uz dodatak većeg kamenja 500...750 mm, volumen šupljina opada na 30%. Ako je grubi agregat prašnjav, treba ga prije ugradbe isprati.

Na osnovi gornjih procenata šupljina proizlazi da utrošak cementa po m³ kolkret-betona, a kod mješavine kolgraut-morta npr. 1:3, iznosi 120...200 kg. U samom kolgrautu, pri omjeru 1:3, iznosi količina cementa oko 475 kg/m³.

Kolkret-beton postiže čvrstoće, naročito tlačne, kao i normalan beton, a sigurno veće od betona ugrađenih kontraktorom, jer za kontraktorski beton potreban je mnogo veći vodocementni faktor. Nepropusnost kolkret-betona vrlo je velika, mnogo veća nego betona s kontraktorom, čemu je također razlog količina vode. Skupljanje kolkret-betona vrlo je malo 1/2...1/3 skupljanja normalnog betona.

Prionljivost za stari beton vrlo je dobra ako je pravilna ugradba. Utrošak kolgraut-morta upravo je toliki koliki je volumen šupljina, a cement se kod ugradbe u vodi praktički uopće ne gubi iz koloidnog morta. Kolgraut-mort se ne miješa s vanjskom vodom, pa se s njim može raditi i po kiši i u vodi.

Daljnje pojeftinjenje s tim betonom je što se grubi agregat ne miješa u miješalici, u kojoj se miješa samo 30...50% kubature betona.

Ugradba je vrlo brza, znatno brža nego pri radu s kontraktorom, pa se uz dobru opremu i organizaciju može za 24 sata izbetonirati 500...4000 m³ kolkret-betona.

Kolkret-beton je za podmorske radove jeftiniji, brže se s njim radi, nepropusniji je, većih čvrstoća, a manjeg skupljanja od betona izrađenih kontraktorom, pa je vrlo prikladan za podvodne radove. Kod radova u vodi isprva se uzima mješavina morta 1 : 1,5, a kasnije 1 : 2 do 1 : 3, u masenim omjerima. Kolgraut-mort je oko dva puta teži od vode.

Ako betoniramo niske i manje konstrukcije, npr. plitke temelje strojeva na suhu, možemo kolgraut-mort lijevati u agregat, jer koloidni mort uslijed težine i žitkosti teče prema dolje, a zrak i eventualnu vodu potiskuje prema gore ili na strane, i ne miješa se s njima. Ako su mase betona veće, i veće dubine objekta koji betoniramo, a naročito ako betoniramo pod vodom, kolgraut-mort se ugrađuje pod pritiskom kroz cijevi ugrađene zajedno s agregatom.

Cijevi kroz koje se injicira imaju dimenzije od 1,5...2", a postavljaju se na razmak od oko 2,0 m. S napretkom rada cijevi se postepeno i jednakomjerno dižu, ali njihov donji dio ostavlja se uvijek uronjen malo u masu morta.

Eventualno potrebna čelična armatura ili koje cijevi i sl. vrlo se lako postavlja paralelno s ugradbom agregata, i to ne čini nikakve smetnje kod injiciranja.

Na kraju bih želio dati nekoliko podataka o strojevima i uređajima za izradu kolkret-betona, koji se izrađuju u Nemačkoj. Ovi podaci bit će od koristi našim građevnim poduzećima da dobiju jasniju sliku o potrebnom opsegu opreme s tom mehanizacijom. Kolgraut-mort miješa se u posebnim miješalicama s jednim ili dva bubnja, budući da se sâmo miješanje vrši u dva dijela. Najprije se miješa cement i voda, a onda se dodaje pijesak i ponovno zajedno miješa.

Kolkret-miješalica sa dva bubnja (marka III) kapaciteta je 115 l. U prvom bubnju miješa se cement i voda, a u drugi se dodaje pijesak. Trajanje svakog miješanja je 15 s. Vrijeme potrebno za izradu kompletne mješavine, sa svim manipulacijama i gubicima vremena, iznosi 1 do 2 minute.

Izrađujemo npr. mješavinu 1 : 3 (cement 50 kg, pijesak 150 kg i voda 25 l). Učinak stroja na sat iznosi 3,5...6,0 m³ kolgrauta. Ako šupljine krupnog agregata iznose 40%, za 8 sati rada izbetonirat ćemo 100...150 m³ betona. Masa stroja je oko 1,0 t, a pokreće ga elektromotor od 15 KS ili dizel-motor od 16 KS.

Ima i većih tipova, zapremine od 230 l (marka IV). Na sat proizvede kolgraut-morta za 20...50 m³ kolkret-betona ili za 24 sata 3 000...4 000 m³. Kolkret-miješalica s jednim bubnjem (marka III). U jednom bubnju vrše

se obje operacije miješanja. Kapacitet miješalice je 115 l, a za jedn sat izbaci 1,7...2,8 m³ kolgraut-morta.

Za izradu kolgraut-morta postoji još jedan tip miješalice, tzv. miješalica na valjke. Ovaj tip najviše se upotrebljava za izradu morta koji se nabacuje pod tlakom, ili za manje količine kolkret-betona. Postoje tipovi različite veličine, od 14,56 do 112 l. Mort se miješa u jednom kotlu, a miješanje traje 30 s. Kapacitet po satu najveće ove miješalice iznosi oko 3 m³ kolgrauta.

Ako treba mort transportirati na veću udaljenost ili pod većim pritiskom, ubacuje se između miješalice i mjesta ugradbe Colmohno-pumpa. Colmohno-pumpe proizvodi Maschinenfabrik Gabr. Netzsch, Frankfurt am Main. Kapacitet tlačenja modela 10 iznosi 5...9 m³ kolgraut-morta na sat, a može transportirati mort kroz cijevi na udaljenost od 200 do 500 m. Colmohno-pumpa razvija pritisak od 7 do 12 atm, a mort se kreće kroz cijevi brzinom od 2,5 do 3,7 m/s.

U svim spomenutim kolkret-miješalicama može se proizvoditi i koloidna mješavina samo cementa i vode. Ta mješavina s uspjehom se upotrebljava za injiciranje pri asanaciji betona, o čemu sam govorio u poglavlju o injiciranju. Kolgraut-mort vrlo je prikladan za injiciranje kablova u konstrukcijama od prednapregnutog betona, jer možemo tlačiti gusti koloidni mort koji kasnije ne segregira i ne otpušta vodu. Ova je voda neugodna jer se skuplja na najnižim tačkama kabela, pa lako dolazi do korozije čelične žice. Kolgraut-mort može se upotrijebiti i za torkretiranje. Postupak se zove kolgunitiranje. Taj mort najčešće se izrađuje u spomenutoj miješalici na valjcima, te se pod pritiskom štrca na podlogu koja se torkretira.

Kolgraut-mort može se mehanički, pod pritiskom, utiskivati u fuge i sljubnice zida od opeke ili kamena. Na taj se način provodi asanacija zidova mnogo bolje nego ručno, jer mort ulazi duboko u fuge i potpuno ih ispunjava.

Ova, razmjerno još nova i mlada, kolkret- odnosno prepakt-metoda zaslužuje naročitu pažnju, pa joj treba posvetiti još mnogo rada i izučavanja da se razjasne mnoge nepoznate pojave i otklone nedostaci, a poboljša izrada.

Vidjeli smo njene velike prednosti naročito za podmorska betoniranja, koliko u kvaliteti betona, toliko i u brzini izrade i jeftinoći, uspoređujući je s betonom izrađenim kontraktorom. Iako je u svijetu tom metodom izgrađeno mnogo pomorskih objekata ne postoje dugoročna opažanja i kontrole, iz jednostavnog razloga što je njena primjena još prekratka.

I kontrole i ispravci i poboljšanje stoje tek pred nama. Kada to govorim mislim uvijek na podmorski beton, jer njega izraditi otpornim i trajnim, a pri tome i jeftinim, nije lako.

UPOTREBLJENA LITERATURA

L'Hermite: *La science du béton.*

L'Hermite Robert: *O nekim općim pojmovima tehnologije betona,* Naše građevinarstvo 1953, br. 5.

Raymond E. Davis: *Prepakt Method of Concrete Repair.* Journal of the American Concrete Institute, august 1960.

G. Brux: *Das Colcrete-Verfahren und seine Anwendung in Deutschland,* Zement — Kalk — Gips, br. 5, 1959.

G. Brux: *Das Colcrete-Verfahren und seine Anwendung im Staudamm — und Talsperrenban sowie als Unterwasserbeton,* Schweizerische Technische zeitshrift, br. 4, 1960.

G. Brux: *Das Colcrete-Verfahren und seine Anwendung im Wasserbau.* Die Bauwirtschaft br. 3, 1960.

G. Brux: *Anwendung des Colcrete-Verfahrens im Fluss-See und Hafenbau.* Bauplanung — Bautechnik br. 9, 1959.

Gutberlet: *Der Colcret — Beton und seine Anwendung.* Die Bauwirschaft, 31. oktobar 1953.

M. Duriez: *Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments...* Travaux, br. 3...7, 1953.

M. J. Chefdeville: *Beton de blocage et mortiers activés.* Annales de l'institut technique du batiment et des travaux publics, decembar 1959.

S. Droljc: *Kemijska korozija betona in betonskih konstrukcij.* Posvetovanje o zaščiti betona in betonskih konstrukcij. Ljubljana, 1960.

M. Ferjan: *Metode ograjanja betona.* Posvetovanje o zaščiti betona in betonskih konstrukcij. Ljubljana, 1960.

O VJETROVIMA JADRANSKOG POJASA

Vjetar nastaje uslijed strujanja zraka, koje opet nastaje radi različitosti temperature u pojedinim krajevima, te zbog rotacije zemlje.

Jačina vjetra određuje se mjerenjem njegove brzine, ili se ocjenjuje prema vidljivim učincima, Beaufortovom ljestvicom. Ocjena po vidljivim učincima određuje se prema kretanju predmeta usljed vjetra, ili prema obliku i veličini valova na vodi. 1926. g. međunarodno je utvrđen odnos u Beaufortovoj ljestvici prema izmjerenim brzinama ovako:

	Brzina u m/s	Brzina u km/h
0 tišina	0 ... 0,5	0 ... 1,80
1 lahor	0,6 ... 1,7	2,16 ... 6,12
2 lagan povjetarac	1,8 ... 3,3	6,48 ... 11,88
3 slab vjetar	3,4 ... 5,2	12,24 ... 18,72
4 umjeren vjetar	5,3 ... 7,4	19,08 ... 26,64
5 živ vjetar	7,5 ... 9,8	27,00 ... 35,28
6 jak vjetar	9,9 ... 12,4	35,64 ... 44,64
7 žestok vjetar	12,5 ... 15,2	45,00 ... 54,72
8 olujan vjetar	15,3 ... 18,2	55,08 ... 65,52
9 oluja	18,3 ... 21,5	65,88 ... 77,40
10 teška oluja	21,6 ... 25,1	77,76 ... 90,36
11 orkanska oluja	25,2 ... 29,0	90,72 ... 104,40
12 orkan	> 29,0	> 104,40

Prema našim PTP br. 2 određene su zone brzine vjetrova po kojima treba dimenzionirati pojedine objekte. Čitava naša obala od jugoslavensko-talijanske granice pa tamo do Stona na Pelješcu, te od Petrovca do albanske granice, označena je kao III zona jake bure. Dio obale od Stona do Petrovca je zona I, tj. zona umjereno jakih vjetrova. Za svaku zonu propisi tačno određuju jačinu vjetra. Kad se pritisak vjetra izračunava iz izmjerene brzine, naši PTP br. 2 kažu ovo:

$$W = 1/16\ v^2_{\text{maks aps}}$$

$$W = 1/25\ v^2_{\text{maks sred.}}$$

gdje je:

$v_{\text{maks aps.}}$ = maksimalna brzina vjetra u m/s konstatirana u razdoblju od najmanje 10 godina.

$v_{\text{maks sred.}}$ = brzina srednjeg maksimalnog godišnjeg vjetra u m/s konstatirana u razdoblju od najmanje 10 godina.

Uzima se ono djelovanje vjetra W u kp/m² koje od gornje dvije formule daje najpovoljniji, tj. veći rezultat.

Ako se ukaže potreba da izračunavamo pritisak vjetra prema podacima o brzini vjetra, postupamo ovako: Ako masa uzduha m udara okomito na plohu F brzinom v, dobivamo odnos

$$m \cdot v^2/2 = Q \cdot v \text{ gdje je } Q = m \cdot v/2$$

Masa vjetra m koja djeluje u jedinici vremena iznosi

$$m = F \cdot v \cdot \gamma/g$$

gdje je:

F = površina na koju udara vjetar

v = brzina vjetra u m/s

γ = spec. težina zraka 1,293 kp/m³

g = ubrzanje sile teže 9,81 m/s²

odavle je Q nakon uvrštenja

$$Q = F \cdot v^2 \cdot \gamma/2g$$

Pritisak vjetra na jedinicu površine ($F = 1$)

$$p = \frac{\gamma}{2g} \cdot v^2$$

kako je

$$\frac{\gamma}{g} \cong \frac{1}{8}$$

$$p = v^2/16 = 0{,}0625\ v^2$$

U ovu formulu ubacuje se i neimenovani koeficijent $c = 1{,}2 \ldots 1{,}4$, koji uvrštava specifičnosti građevine kao što su oblik, veličina, utjecaj sisanja, turbulentna gibanja zraka itd.

$$p = 1{,}3 \cdot 0{,}0625\ v^2 = 0{,}083\ v^2$$

Prema formuli $v = \sqrt{p/0{,}0625}$ dobivamo da pritisak

od 80 kp/m² odgovara brzini vjetra od 35,8 m/s ili 129 km/h

od 110 kp/m² odgovara brzini vjetra od 42,0 m/s ili 151 km/h

od 130 kp/m² odgovara brzini vjetra od 45,6 m/s ili 164 km/h

Bura na sjevernom i srednjem Jadranu na pojedinim mjestima, npr. kod Senja, doseže kadkada brzine i preko 180 km/h. Na sjevernom Jadranu procentualno je bura godišnje mnogo češća od juga, a na jugu je razmjer obratan.

Zimi imamo u prosjeku oko 30% mirnih dana, 50% umjereno vjetrovitih, a 20% s jakim vjetrovima.

Ljeti na Jadranu mirnih i tihih dana imamo oko 40%, umjereno vjetrovitih 55%, a samo oko 5% olujnih.

Kod projektiranja pomorskih objekata poznavanje jačine vjetra i njihova smjera, te učestalosti vrlo je potrebno, pa sam se zato ukratko osvrnuo i na tu tematiku.

Udomaćeni nazivi vjetrova prema smjeru odakle pušu:

sjevernjak	—	tramontana
sjeveroistočnjak	—	bura, grego, greco
istočnjak	—	levant
jugoistočnjak	—	široko
južnjak	—	jugo
jugozapadnjak	—	lebić, lebićada
zapadnjak	—	pulenat, ponente
sjeverozapadnjak	—	maestral

O MORSKOJ VODI I NJENIM SILAMA AGRESIJE

Da bismo mogli razmatrati uticaj morske vode na beton moramo poznavati morsku vodu i njene karakteristike. Morska voda, njena kretanja i život u njoj djeluju različito na hidrotehničke objekte, pa možemo govoriti o kemijskom, mehaničkom, fizikalnom i biološkom djelovanju morske vode. Teoretski, kemijska agresija morske vode zavisi od stepena saliniteta. U prirodi te razlike faktično nisu značajne, pa ih radi ilustracije navodim u tablici 21.

Tablica 21

More	Slanost u kg/m³
35,0	Atlantski ocean
38,0	Jadransko more
38,77	Sredozemno more

Iz tablice je vidljivo da je slanost Sredozemnog mora veća od slanosti oceana, a Jadranskog mora nešto veća od srednje slanosti Sredozemnog mora.

I unutar razmjerno malog Jadranskog mora slanost je na pojedinim područjima vrlo različita. Slanost južnog dijela je oko 38%, dok prema sjeveru ona opada na 33%. Isto se tako može kazati da je slanost uz obale manja, naročito u blizini ušća značajnijih rijeka. Tako npr. u šibenskom zaljevu slanost iznosi oko 23%. Kod ušća rijeka morska voda prodire u riječni tok, pa se u nižim slojevima vode opaža slanost još daleko od ušća.

Morska voda kod nas uz obalu imade alkaličnu reakciju sa pH = 8,15 . . . 8,30.

Prema JUS U. MI 014/1959. smatra se da je

— voda slabo štetna za beton ako je sadržaj štetnih sastojaka veći od 300 mg/l, a manji od 1000 mg/l, ili ako je pH $<$ 6
— voda je jako štetna za beton ako je sadržaj štetnih sastojaka veći od 1000 mg/l, ili ako je pH $<$ 5.

Približan sastav vode Jadranskog mora prema glavnim zastupanim elementima u 1 litri:

Tablica 22

Sastojak	Količina u mg
SO_4	2,970
Mg	1,420
Ca	457
Cl	21,250
Na	11,810
K	390
Ukupno:	38,297

Analiza 1 litre vode Jadranskog mora prema najzastupanijim spojevima daje ovaj sastav:

NaCl	30,07 g
MgCl	3,87 g
$MgSO_4$	2,49 g
$CaSO_4$	1,40 g
KCl	0,86 g
$MgBr_2$	0,08 g
$CaSO_3$	0,02 g
	38,77 g

Izračunamo li u procentima sastav osnovnih soli Jadranskog mora dobijemo:

Tablica 23

Soli	%
Na Cl	77,5
Mg Cl	9,95
Ukupno klorida	87,45
Ca SO_4	3,62
Mg SO_4	6,42
Ukupno sulfata	10,04

Magnezijev klorid i magnezijev sulfat štetni su sastojci morske vode za beton, jer djeluju s kalcijevim oksidom iz betona, stvarajući među zrnima pijeska želatinoznu masu magnezijeva hidroksida, i gips.

Osim gore nabrojanih, u moru se nalazi i drugih elemenata i soli, npr. joda, željeza, fosfata itd., ali u tako malim količinama da za naša posmatranja agresije na beton ne dolaze u obzir, i o njima neću govoriti.

Spomenut ću još čestu pojavu u većim lukama, naime da na površini mora plivaju različita ulja, nafta itd., što ako trajnije djeluje može kemijski razoriti beton.

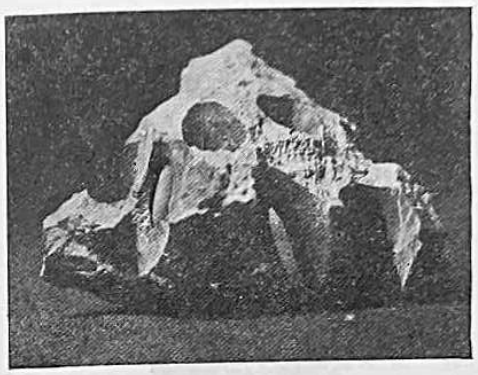
Na podmorski beton već nakon kratkog vremena počinju se hvatati različiti predstavnici morske faune i flore kao što su alge, morske trave, priljepci, račići itd., koji svojim životnim procesima u tijelu i izlučivanjima stvaraju jače mjestimične koncentrate nitrata, nitrita, fosfata ili nekih kiselina, a ti spojevi mogu također izazvati lokalnu agresiju na površini betona.

Kako me je kemija dovela do biologije, treba ovdje spomenuti i neke školjkaše koji često napadaju i oštećuju betonske obale. To su kamotočac ili školjka svrdlara (Pholas dactylus) i prstić (Lithodomus lithophagus) nalik datuli. Vjerojatno je da te životinje izlučuju neke kiseline koje otapaju u blizini ljuske kalcijev karbonat, pa tako vrtnjom ulaze u tvrdi vapnenac ili beton.

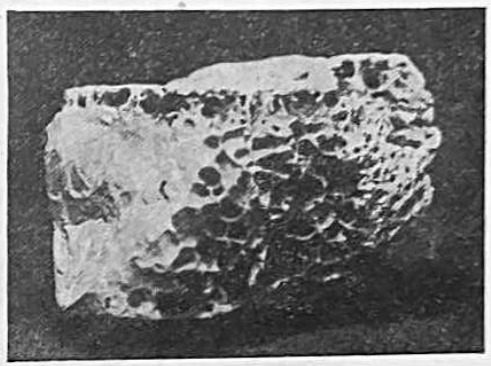
Na slici 30 vidi se kamen izvađen iz podzemnog dijela obalnog zida koji je bio napadnut od tih štetočina.

Osim spomenutih školjkaša napada kamen u moru i silikatna spužva s iglicama zvana Cliona, koja životnim procesima stvara u vapnencu šupljine poput pčelinjeg saća. U te šupljine kasnije se često useljuju različite alge.

U Jadranskom moru postoje stalne struje koje uz našu obalu teku sjevero-zapadnim smjerom, dakle od Ulcinja uz obalu do Rijeke, Pule i Trsta. Brzina tih struja kod Boke Kotorske iznosi oko 13 km/dan, dok su dalje na sjeveru te brzine mnogo manje i iznose 3,5 . . . 4 km/dan.



Slika 30. Kamen vapnenac izbušen od prstića. Na lijevoj strani vidi se prstić u šupljini koju je izbušio u kamenu



Slika 31. Kamen vapenac izvađen iz mora, napadnut od silikatnih spužava Cliona. Na lijevoj strani vidi se čvrst, monolitan kamen još nenapadnut, a desna strana je već posve uništena

Amplituda plime i oseke također ie različita, na jugu je mala, a prema sjeveru veća. Visina srednje plime u južnoj Dalmaciji iznosi 25. . .30 cm, kod Rijeke 47 cm, a kod Pirana 98 cm.

Temperatura na površini našeg mora u jesen i zimi toplija je od zraka, dok je ljeti obrnuto. Dnevne razlike u temperaturi opažaju se do dubine mora od 20 m. Na južnom dijelu Jadrana najniže temperature mora iznose oko 12 °C, u sjevernim dijelovima padaju i do 7 °C, a ljetne maksimalne temperature iznose i do 27 °C.

Valovi koji nastaju najčešće zimi za vrijeme dok puše jugo ili široko dosežu na Jadranu visinu i do 3,5 m, dok su oni od bure niži, najveće visine od oko 2,5 m. Utjecaj valova može se opaziti do dubine od oko 35 do 40 m.

Mehaničko razorno djelovanje mora očituje se:

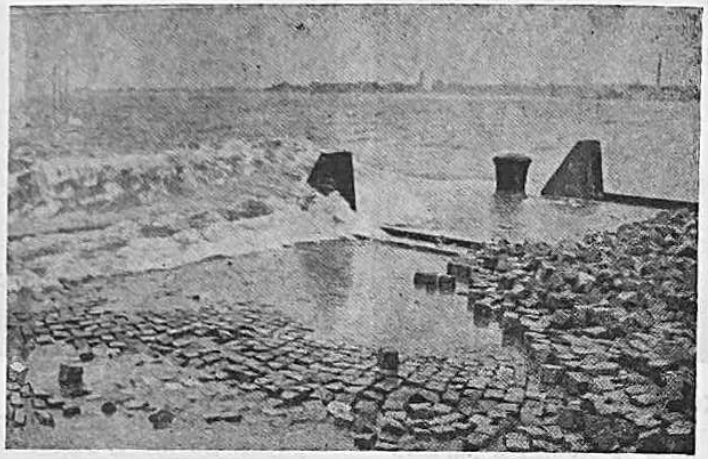
a) udarcima valova o lučke i obalne građevine

b) brušenjem, uslijed trenja pijeska u pokretu i udarima većih valutica i kamenja o obalne građevine

c) udarima brodova i plovnih objekata o obale

a) Valovi ovise o stazi i brzini vjetra te dubine mora. Udarci valova na oceanu mogu doseći pritisak od 30 do 35 Mp/m² i time ugroziti, a često i uništiti, pomorske građevine. Naročite štete mogu izazvati jaki valovi na još nezaštićenim objektima u gradnji. Kod nas je poznat slučaj znatnijeg oštećenja za vrijeme gradnje novog lukobrana u Baru, gdje su iznenadni jaki valovi odnijeli, odnosno porazbacali, tek postavljene betonske blokove od 60 t. Takve nezgode nisu rijetke i teško ih je predvidjeti, odnosno od njih se

osigurati. U luci Genove za jaka nevremena pomaknuti su npr. masivi-giganti od 1000 t, a takvih i sličnih oštećenja i prodora bilo je u mnogim lukama svijeta. Budući da posljedice ovakovih nevremena mogu financijski vrlo teško pogoditi i investitora i poduzeće, potrebno je predviđeti gradnju takvih objekata u periodima vremena kada se ne očekuje katastrofalno nevrijeme.



Slika 32. Kratkotrajan, ali jak jugozapadnjak »lebić«, razorio je gornji stroj industrijskog gata u Umagu

b) Ako uz neki podmorski objekt permanentno teku morske struje ili udaraju valovi koji nose pijesak ili šljunak, često u donjim dijelovima objekta dolazi do oštećenja nastala brušenjem i trenjem pijeska o beton. Ovakva oštećenja naročito su neugodna na armirano-betonskim konstrukcijama jer stradava zaštitni sloj betona, pa je ogoljena armatura direktno izložena koroziji i propadanju. Pojavu brušenja betonskih obala od udara sitnog pijeska opazio sam naročito u brodogradilištima, gdje brodovi vezani uz obalu ispituju rad propelera. Snažna turbulentna gibanja vode pokreću pijesak sa dna, te on udara o stijene obale i brusi ih. Zaštita obala u ovakvim slučajevima provodi se tako da se uz prednju stranu obale izvede dovoljno široka kamena bankina.

Daljnja mehanička djelovanja koja ugrožavaju pomorske građevine jesu udari većeg kamenja koje valovi bacaju o valobrane, obale i sl. Za jaka nevremena takvi udari mogu biti razorni, jer veliki valovi mogu pokretati i vrlo veliko kamenje.

c) Brodovi vezani uz obalu mogu uslijed valova ili vjetra također prenositi vrlo velike tlačne ili vlačne sile na obalne zidove, pa s tim silama treba računati, da ne bi zbog njihova djelovanja došlo do pomaka i oštećenja. O veličini i proračunavanju tih sila bit će govora u posebnom poglavlju.

Djelovanje plime i oseke također možemo ubrajati u mehanička djelovanja morske vode. Uslijed naizmjeničnog sušenja i potapanja betona dolazi do bržeg razaranja nego u zonama koje su trajno pod morem.

Pritisak leda, kao daljnje mehaničko djelovanje, neću posebno razmatrati jer se na Jadranu toga ne treba bojati. Kod nas se može pojavljivati smrzavanje i otapanje u nadmorskom dijelu pomorskih građevina jedino kada se voda u porama i šupljinama betona smrzava. Povećanjem volumena led razara beton, i tako dolazi i do fizikalnih oštećenja o kojima sam već govorio.

Na koncu bih ovdje spomenuo i električnu koroziju čelične armature armirano-betonskih konstrukcija u moru, s kojim ću se važnim pitanjem također detaljnije pozabaviti u posebnom poglavlju.

UPOTREBLJENA LITERATURA

M. Duriez: *Action de l'eau de mer*, Travaux, br. 3...7, 1953.

I. A. Voronov: *Morskie sooruženiy iz betona i železobetona*. Moskva, 1950.

A. Ercegović: *Istraživanja o temperaturi, salinitetu, kisiku i fosfatu jadranskih voda srednjodalmatinske obale.*

I. Barbić: *Kako morska voda utiče na cement*, Građevinar, br. 5, 1960. g.

I. Celmić: *Uticaj morske vode na beton*, Građevinar, br. 6, 1957. g.

L. Babić: *Studija o izradi betona otpornog protiv agresivnog djelovanja morske vode.* Naše građevinarstvo, br. 8, 1957. g.

K. Babić: *Život Jadranskoga mora.*

DJELOVANJE MORSKE VODE NA BETON

Još uvijek nisu raščišćene sve pojave i svi procesi koji nastaju djelovanjem morske vode na beton, iako je baš posljednjih nekoliko godina na tom polju učinjen velik korak naprijed. U poglavlju o morskoj vodi govorio sam o silama i pojavama agresije, a sada ćemo razmotriti pojave koje nastaju uslijed djelovanja tih sila na beton. Ovdje moramo lučiti betone koji su stalno izvrgnuti djelovanju morske vode, tj. koji su trajno pod morem, od onih koji su djelomično u vodi, a djelomično na suhu, te time najčešće izloženi djelovanju plime i oseke.

Vidjeli smo da u jednoj litri Jadranskog mora ima oko 3,89% sulfata, što znači oko 10% svih osnovnih soli (vidi tablicu 23) ili po jednoj litri mora 3000...4000 mg sulfatnih aniona. Gledajući brojčano, količina sulfata u moru veća je nego u običnim sulfatnim vodama, pa bi to ukazivalo i na jaču agresiju morske vode. Ipak to nije tako. U morskoj vodi, iako u malim količinama, ima otopljenog CO_2 koji dolazi u vodu iz direktnog dodira mora sa zrakom, te izlučen nakon tzv. procesa izgaranja i života mnogih živih organizama u moru.

Morske životinje svojim životnim procesima izlučuju slobodnu ugljičnu kiselinu u more, a biljke je međutim apsorbiraju, i tako sprečavaju koncentriraniju ugljično kiselu koroziju betona. Karbonizacija površinskog sloja nastaje nakon apsorbiranja ugljične kiseline, koja se nalazi u ravnoteži s kalcijskim bikarbonatom otopljenim u moru. Na taj se način stvara nerastvorljivi karbonat koji se taloži na površini betona, zatvarajući time njegove pore pa otežava ili sprečava ulaz moru i njegovim solima u unutrašnost betona. Napominjem da i magnezijski hidrokarbonat također stvara na površini betona karboniziran sloj koji štiti beton od korozije. Ako voda sadrži male količine CO_2, kao što je to slučaj u moru, može doći do formiranja $CaCO_3$ i vezanjem netopljivog vapna izlučenog iz betona sa CO_2 iz mora. Kada voda sadrži znatnije količine CO_2 do korozije betona dolazi brzo jer se stvara topljivi bikarbonat, pa uslijed toga dolazi do brzog ispiranja vapna iz betona.

Kao daljnja zaštita pojavljuje se na površini betona sloj mikroorganizama morske flore, koja zatvarajući površinske pore betona povećava otpor prolaza tvari smanjenjem brzine izmjene iona u oba pravca. Općenito se može kazati da morska flora štiti beton od razaranja, a morske životinje pridonese njegovu raspadanju. To su uglavnom uzroci zbog kojih je morska voda manje agresivna od čistih sulfatnih voda, iako ima razmjerno velik procent sulfata.

Pogledajmo kao primjer sastav običnog portland-cementa dosta bogat vapnom, u okruglim procentima:

trikalcijev silikat	C_3S	40%
bikalcijev silikat	C_2S	33%
trikalcijev aluminat	C_3A	16%
tetrakalcijev aluminoferit	C_4AF	6%
		95%

Ta četiri glavna spoja svojim međusobnim omjerima daju karakteristike portland-cementa. Ostatak od 5% otpada na manje zastupane i manje značajne spojeve, neotopljive ostatke i gubitke pri žarenju.

Najopasnije je stvaranje Candlotove soli, tj. trikalcijeva sulfoaluminata u prašinastoj formi, vrlo ekspanzivnog, koji upijanjem molekula vode povećava svoj volumen pa uslijed bujanja dolazi do razaranja betona.

Ta dvostruka sol stvara se spajanjem trikalcijeva aluminata i kalcijeva sulfata u prisustvu otopljena vapna.

Morska voda koja oplakuje i natapa podmorski beton sadrži preko 6% magnezijeva, 3,5% kalcijeva, te ispod 1% natrijeva i kalcijeva sulfata. ukupno oko 10%.

U prisustvu otopljena vapna iz betona magnezijev sulfat prelazi u kalcijev sulfat, koji kako je rečeno stvara Candlotovu sol, iako je taj proces usporen radi prisustva velike količine NaCl u moru.

Prisustvo dakle trikalcijeva aluminata u portland-cementu opasnost je za stvaranje Candlotove soli u podmorskim betonima. Američke norme prema tome određuju da cementi otporni na morsku vodu mogu imati C_3A (trikalcijeva aluminata) najviše do 8%, a ako taj procent prelazi 14%. oni više ne zadovoljavaju za radove u moru.

Iz ovoga vidimo da ranije izabrani portland-cement, čiju sam analizu glavnih spojeva kao primjer naveo, ne bi odgovarao za radove u moru zbog prevelikog procenta C_3A. Ako cement sadrži veće količine željeznog oksida dolazi prije do formiranja neopasnog C_4AF, tzv. tetrakalcijeva aluminoferita, a tek nakon toga preostatak aluminija formira opasni C_3A.

Vidjeli smo da i otopljeno vapno iz betona igra važnu ulogu u negativnim pojavama, pa za podmorski beton treba upotrebljavati cemente siromašne na vapnu.

Iz ranijeg razmatranja portland-cementa znamo da trikalcijev silikat oslobađa brže i više vapna od bikalcijeva silikata. Prema tome cementi za radove u moru ne smiju imati velik procenat C_3S. U prve 2 do 3 godine cementi koji imaju više C_3S ne pokazuju manju otpornost u moru od onih sa više C_2S, ali kasnije su ti betoni otporniji od alitnih.

Poznato je da je vapno jače topljivo u morskoj vodi nego u slatkoj, a isto tako da je smjer difuzije iznutra prema van, tj. od jačeg koncentrata rastvora vapna u masi betona prema slabijoj koncentraciji u moru. Tom pojavom nastaje daljnje oštećenje betona, jer difuzijom vapna dolazi do ispiranja, odnosno poroznosti mase betona, a time i do slabljenja betona, te prodiranja morske vode pod pritiskom u unutrašnjost betona, čime se front napada sve više proširuje.

Prodorom morske vode kroz stvorene pore ubrzava se hidroliza silikata i aluminata, oslobađa se novo slobodno vapno, koje s nadošlim sulfatima i trikalcijevim aluminatom betona stvaraju Candlotovu ekspanzivnu sol, koja bujanjem dalje razara strukturu betona. Pri tome jedan dio aluminata i silikata prelazi u želatinozne aluminijske i silicijske okside, koji gel obavija preostale još netransformirane aluminate, silikate i još nehidratizirana veća zrna samog cementa. Difuzija iona i soli kroz gel mnogo je polaganija nego kroz vodu, pa se radi toga usporava čitav proces tih negativnih pojava.

Početak razaranja, tj. difuzija, bila je fizikalna pojava koja je omogućila jače i dublje kemijske promjene, a obje zajednički razorno su djelovale na beton.

Izlučivanje vapna još se povećava, budući da se u morskoj vodi nalaze veće količine natrijeva klorida.

Korozija betona uslijed djelovanja čiste gipsne reakcije, tj. kad dolazi do kristalizacije $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, vrlo je mala, jer u prisustvu NaCl u moru rastvorljivost gipsa tolika je, da do kristalizacije tako reći ne može ni doći.

Magnezijska korozija betona vrlo je mala, jer je koncentracija Mg iona u morskoj vodi minimalna.

Mnogim laboratorijskim pokusima, naročito u Sovjetskom Savezu, dokazano je da je sulfatna korozija to slabija, što u vodenom rastvoru imade više iona klora. Budući da taj slučaj imamo u moru, neki stručnjaci postavili su teoriju da do korozije betona u moru ne dolazi stvaranjem trikalcijeva sulfoaluminata. Kasnije je ipak dokazano da to ne stoji, već da uslijed znatnog sadržaja klorida u moru dolazi do usporenih agresivnih reakcija sulfata.

Kalcinacija površine betona, o kojoj sam već ranije govorio, igra također važnu ulogu. Ukoliko upotrebljeni portland-cement sadrži veće procente C_3S i C_3A, dakle uz obilje aluminata hidratacijom oslobađa i veće količine slobodna vapna, kloridi morske vode neće biti u stanju paralizirati ili spriječiti stvaranje Candlotove soli i beton će propasti.

Ako pak upotrijebimo portland-cement s malim procentom C_3A i malom zasićenošću vapna, beton će uslijed povoljnog utjecaja klora biti otporan u morskoj vodi.

Vidimo dakle da stvaranjem Candlotove soli, odnosno stupanj otpornosti betona u moru izrađenog od portland-cementa, uvelike ovisi o mineraloškom sastavu izabranog cementa. Tu svakako važnu ulogu igra i gustoća i nepropusnost izrađenog betona, o čemu će kasnije biti posebno govora.

Ako u upotrebljenom cementu ima dovoljno aktivna silicijskog oksida kao kod pucolanskog cementa, onda ne dolazi do stvaranja trikalcijeva sulfoaluminata, jer će pucolan već prije apsorbirati otopljeno slobodno vapno, te tako neće doći do stvaranja Candlotove soli.

Iz dosadanjih razlaganja vidimo kako su kemijske promjene koje nastaju u betonu pod morem vrlo složene kako zbog različitih sastava pojedinih cemenata, tako i zbog mnogobrojnih elemenata i spojeva morske vode. Sve te reakcije koje nastupaju međusobno se isprepliću, vremenski različito nastupaju i djeluju, pa nije ni čudo da se još uvijek nije potpuno ušlo

u bit same korozije. Dijelovi betonskih građevina oko površine mora, tj. u zoni plime i oseke, najjače su izloženi mnogim mehaničkim utjecajima kojima nisu izloženi dijelovi u većim dubinama.

U tom području beton se za vrijeme plime puni morskom vodom, a za oseke suši, što se konstantno i kontinuirano ponavlja svakih 6 sati. Močenje i sušenje betona izaziva skupljanje i bubrenje betona, a time u vezi dolazi i do stalnog mijenjanja naprezanja. Osim toga taj je dio betona izvrgnut stalnom ispiranju, što pospješuje izluživanje, beton time postaje porozan i slabije strukture, te ga udarci valova počinju kidati i razarati.

Budući da je svaki beton više ili manje kapilaran morska se voda u kapilarama penje pod kapilarnim vlakom i u dijelove betona iznad razine mora. Za vrijeme ljetnih žega ta se voda isparuje, a kapilare se polako pune sa soli, pa je to također jedan od vidova razaranja betona u tom području, jer kristali soli mogu povećati svoj volumen i izazvati slična razaranja kao ona od smrzavanja, odnosno leda.

S ovim sam, mislim, obuhvatio sve glavne pojave kojim morska voda razorno djeluje na beton, pa ćemo lakše moći razmotriti i odrediti koje cemente i kakav beton treba upotrebljavati za podmorske građevine.

UPOTREBLJENA LITERATURA

M. Duriez: *Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments.* Travaux, 3...7, 1953.

J. Brocard: *La corrosion du beton.*

V. V. Kind: *Korozija cemenata i betona u hidrotehničkim objektima.*

A. Voronov: *Morskie sooruženiy iz betona i železobetona,* Moskva, 1950.

W. Kronsbein: *Über das Verhalten der Zemente in Meerwassern.*

A. Kleinlogel: *Einflüsse auf Beton.*

IZLUŽIVANJE SLOBODNOG VAPNA IZ BETONA

Do jačeg izluživanja slobodnog vapna iz betona dolazi u slučajevima filtracije ili prolaza vode kroz beton. Voda koja filtrira može biti morska, ali i slatka, do potpuno meke. Kod pomorskih objekata, naročito obala, susrećemo se često sa slučajem da i slatke vode prodiru kroz obalni betonski zid izazivajući koroziju betona izluživanjem, pa se moram i te pojave ovdje dotaći, iako ta korozija nije specifično od morske vode.

Ako nam neki potočić ili koncentrirani vodotok presijeca liniju obalnog zida, trebamo svakako tu vodu uhvatiti i kroz ostavljeni otvor u obalnom zidu odvesti u more. Ako takvo hvatanje vode nije moguće, dobro je iza zida nabiti plastičnu ilovaču, a ispred nje provesti kamenu drenažu, koja bi slatku vodu odvodila paralelno sa zidom do nekog ispusta u more. Takvu zaštitu betonskog zida proveli smo kod poslijeratnog popravka suhih dokova u Puli. Filtracija morske vode sa strane kopna bila je vrlo jaka. Nabijanjem sloja ilovače u tim predjelima potpuno smo spriječili prolaz morskoj vodi, odnosno sveli je na minimum. Filtraciju morske vode susrećemo kod zidova suhih dokova, gdje ona pod pritiskom od 0,8 do 1,2 atm. već prema visini mora, nastoji proći kroz betonske zidove i dno za vrijeme kad je dok prazan. Isto tako do stalne filtracije morske vode dolazi u zoni plime i oseke, gdje je baš korozija izluživala znatna i opasna.

Na zaobalne slatke vode, koje nailaze samo povremeno za vrijeme velikih kiša, često se zaboravlja, pa se one bilo čiste, bilo u dubljim predjelima pomiješane s morem, probijaju kroz beton i traže put ulaska u more.

Intenzitet izluživanja slatke vode to je jači što je voda mekša, dakle najjači je kod kišnice. A isto je tako poznato da je vapno jače topljivo u moru nego u slatkoj vodi.

Filtracija vode kroz beton nije ravnomjerna po čitavoj napadnutoj površini, voda prolazi kroz pojedine kapilare i defektna mjesta. U portland-cementu otpada na vapno oko 65% od ukupne težine cementa.

Pokusima koji su vršeni u laboratoriju konstatiran je pri izluživanju vapna paralelno velik pad čvrstoće betona. Pri izluživanju npr. od 30% slobodna vapna od njegovog ukupnog sadržaja u cementu pad čvrstoće iznosio je oko 60%.

Isprva se sav taj pad čvrstoće pripisivao izluživanju, pa se na tu pojavu gledalo kao na vrlo opasnu. Kasnijim je ispitivanjima ustanovljeno da veći dio smanjenja čvrstoće dolazi uslijed zasićenosti betona vodom. Ta je pojava već otprije poznata, a tumači se da do nje dolazi radi naponskog djelovanja vode u kapilirama. Kada se tako raščlanio pad čvrstoće betona izložen filtraciji vode, uvidjelo se da npr. od ukupnog pada čvrstoće za

50% otpada na izluživanje 10 ... 15%, a na smanjenje čvrstoće vlažnog betona 40 ... 35%.

Beton se dvojako ponaša pri prolazu vanjske vode kroz njegove pukotine, kapilare i pore. Ako je beton lošeg sastava, sa širokim kapilarima i porama koje dobro komuniciraju, voda bez jačeg trenja prodire kroz masu betona. Na svom putu voda odnosi rastvoreno vapno i razorene djeliće betona. Kapilari se na taj način proširuju, razorno djelovanje je jače, i beton naglo propada, a voda u sve većim mlazovima teče i odnosi čestice betona.

Ako je beton nepropustan voda počinje otapati vapno na površini i kroz uske ga kapilare unosi u unutrašnjost. Uslijed ulaženja u unutrašnjosti dolazi do bubrenja koloidnog gela, koji time polako zatvara sitne kapilare. Voda zasićena vapnom u unutrašnjosti u prvo vrijeme ne može dalje otapati slobodno vapno. Tek kad se proces razaranja pomakao nešto dublje voda otapa i tu drugu zonu, ali su kapilari, uglavnom uslijed bubrenja aluminijeva hidroksida i kalcijeva hidrosilikata, kao prvi produkti hidrolize već zatvorili sitne prolaze vodi. Na takvom betonu se vidi da voda sve slabije izbija na vanjsku površinu, dok sama od sebe ne prestane curiti.

Vanjski znak izluživanja vapna bijele su mrlje na površini betona, koje kasnije uslijed podebljanja naslaga karboriziranog vapna izgledaju kao bijela kora. Ta pojava naziva se »cvjetanje betona«. Kod ovakvog nepropusnog betona doći će to brže do vlastite obrane, odnosno zaptivanja kapilara, što se više stvara koloidnih supstancija i što se to događa brže. Kako tome pridonose fino mljevena zgura i pucolani, i cementi će s tim dodacima davati otporniji beton.

Aluminozni cement u slučajevima filtracije nije pogodan, jer se kod njega tako reći ni ne stvaraju koloidni gelovi.

Razmotrimo sad slučaj kada nam morska voda filtrira kroz masu betona. Ako je beton porozan i propustan njegovo propadanje bit će još brže, jer osim dosada nabrojenih korozivnih djelovanja izluživanja vapna dolazi i do kemijske korozije morske vode i stvaranja trikalcijeva sulfoaluminata, koji uslijed jakog bubrenja i povećanja volumena razara strukturu betona.

I ovdje vidimo da je jedino rješenje izrada gustog i nepropusnog betona, a kao vezno sredstvo treba upotrijebiti cemente s dodatkom fino mljevenih pucolana ili zgure.

UPOTREBLJENA LITERATURA

V. V. Kind: *Korozija cementa i betona u hidrotehničkim objektima.*
A. Adamović: *Vycelačivanie cementnoge kamny pod deistviem mygkih vod.*

OPĆENITO O BETONU ZA POMORSKE RADOVE

Prije nego pristupimo razmatranju izrade betona za pomorske radove htio bih se s nekoliko riječi osvrnuti na sam problem općenito.

Izrada betona za pomorske radove vrlo je složen zadatak, koji ovisi o mnogo faktora. Naši kemičari i tehnolozi cementne industrije dali su nam već nekoliko vrsti cementa koji su vrlo otporni protiv agresivnog djelovanja morske vode. Ali time nije riješen sam problem. Upotreba takvih specijalnih cemenata nije dovoljna garancija da će izrađeni beton biti doista otporan protiv morske agresije.

Ovdje se javlja ona različitost koja se pojavljuje kod rada s betonom kojega proizvodimo kao materijal na gradilištu od onih materijala, koje kao gotove proizvode dobivamo iz tvornice na gradilište. Za izradu dobrog betona potrebno je da prvi rad počinje od projektanta, koji već pri projektiranju mora tačno da zna i odredi kakav beton želi, kakve osobine od njega traži, i kako će te kvalitete betona i postići, na osnovi svega do sada razmotrenog.

Tu počinju prve greške. Projektant, a pogotovo konstruktor-statičar, najčešće smatra svoj zadatak završenim kada je objekt ili konstrukciju dobro i ekonomično proračunao i dimenzionirao, te odredio marke betona. Opisi izrade betona puni su ovakvih rečenica: Beton mora da bude nepropustan, granulometrijski sastav mora da bude po Fullerovoj liniji, količina cementa tolika i tolika. Ovakve općenite napomene posve su nedovoljne i najčešće proizlaze odatle što naši projektanti-konstruktori premalo polažu na poznavanje izrade i tehnologije betona, i misle da je dovoljan ispravan statički račun pa da će objekt biti trajan i siguran. To međutim nije tako. Tačno poznavanje tehnologije betona, poznavanje svih utjecaja koji djeluju na beton kroz vijek njegova trajanja, naročito u moru, igraju bar takovu ulogu kao i samo dimenzioniranje, ako ne i veću.

Projektant mora u svakom konkretnom slučaju razmisliti koji i kakav cement treba upotrijebiti i u kojim količinama. S obzirom na lokaciju objekta treba razmišljati o agregatu, te odmah donijeti odluku o maksimalnoj veličini upotrebljenog zrna agregata, odakle će se ekonomično takav agregat dobaviti, kao i o svim posljedicama u vezi s izradom i ugrađivanjem betona koje će uslijediti izborom takva agregata.

Treba razmišljati o vodocementnom faktoru i načinu ugradbe, te uzimati u obzir različite specifične pojave koje mogu imati razorno djelovanje na beton u danim okolnostima. Projektant ne smije sve to tražiti od izvođača i zahtijevati samo čvrst i nepropustan beton, te se sakrivati iza te dvije općenite osobine.

Međutim ako projektant tačno propiše i vrst cementa i njegovu dozažu i vrst agregata i granulometrijski sastav te vodocementni faktor, ni to još ne znači da će beton odgovarati traženim zahtjevima. Važno je da i gradnju izvode stručnjaci koji u tančine poznaju tehnologiju izrade takvog betona, koji poznaju zbivanja u samom betonu i njihove uzroke i posljedice, te vode stalan nadzor nad izradom i ugradbom betona.

Za vrijeme rada potrebno je voditi računa o lokalnim prilikama, specijalnim uslovima i svemu onome što može utjecati na kvalitet izrađenog betona. Beton nije materijal koji se može sa sigurnošću kvalitetno izvesti, ukoliko nije vođena stroga kontrola o svim pojedinostima koje utječu na kvalitet betona.

Iskusan graditelj koji stalno posmatra i prati rad za vrijeme betoniranja, te koji dobro poznaje problematiku svih reakcija što nastupaju ili mogu nastupiti, najveća je garancija da će beton biti doista onakav kakav je zamislio projektant, a želio izvesti izvođač.

Ovim kratkim izlaganjem htio sam upozoriti na to od kolike je važnosti da projektant i izvođač do u tančine poznaju sve materijale koje upotrebljavaju, sve njihove reakcije, od početka do kraja, te tako svjesno odabiru materijale i određuju kako se oni upotrebljavaju.

IZRADA BETONA ZA PODMORSKE RADOVE

Da bi podmorski beton bio otporan protiv agresije morske vode, vidjeli smo da pri tom veliku ulogu igra izbor cementa. Upotrebimo li portland-cement s nižim procentom trikalcijeva aluminata, tj. ispod 8%, odnosno cement koji pri hidrataciji oslobađa što manje vapna, dakle s manje trikalcijeva silikata, možemo očekivati da će takav portland, uz ispunjenje ostalih uslova o kojima ću govoriti, dati otporan beton.

Vijek trajanja podmorskog betona izrađenog od *portland-cementa* dobrog mineraloškog sastava, gustog, nepropusnog i izrađenog umjerenom količinom vode, a bogatog veznim sredstvom, u prosjeku može trajati oko 30 godina. Ako se gornji uslovi ne poštuju, takav će beton propasti već nakon 2 do 3 godine.

Ocijeniti koliko je otporan neki portland-cement u morskoj vodi vrlo je složen problem, i mnogi momenti mogu o tome odlučivati, koje u konkretnom slučaju ne bi trebalo prepisivati otpornosti tog portland-cementa. Sjetimo se pokusa vršenih u Institutu za ispitivanje materijala SRS, kada je beton spravljen s portland-cementom i finom frakcijom pijeska vapnenca, a krupnijom frakcijom kremenog pijeska, pokazao veliku otpornost u morskoj vodi.

Brz zaključak mogao bi nas navesti na misao da je taj portland-cement vrlo otporan u morskoj vodi, a ta otpornost ovisila je, kako smo vidjeli, o drugim faktorima, a ne o otpornosti portland-cementa. Na ovom primjeru vidimo od kolike je važnosti poznavanje svih faktora i svih procesa koji nastaju u betonu, te kako treba voditi računa o tim kompliciranim zbivanjima, uzevši u obzir i zbijenost betona koji smo ispitivali.

Nakon svih ovih izlaganja vidljivo je od kolike je važnosti poznavanje sastava cementa, te procesa koji u moru dovode do korozije betona. U prak si sam često bio pozivan da kao arbiter dadem svoje mišljenje može li se umjesto propisanog pucolanskog cementa upotrijebiti portland-cement, jer trenutačno na tržištu nije bilo pucolana. Argumenat za upotrebu portland-cementa bio je uvijek isti: koliko smo obala izbetonirali s čistim portland-cementom i one još uvijek stoje! Mnoge su propale već nakon 10 do 15 godina kako će one izgledati nakon daljnjih 10 do 15 godina? Prepustili smo slučaju da nam tvornice šalju portland-cement kakvog imaju na skladištu, pa ako odgovara zahtjevima za radove u moru bit će dobro, ako ne, beton će brzo propadati. Ako se dakle odlučimo za upotrebu portland-cementa, trebamo se u prvom redu pozabaviti njegovim mineraloškim sastavom i kontrolirati odgovara li on za radove u moru. Međutim iako portland odgovora traženim uslovima smanjene zastupanosti C_3A i C_3S ni tada nismo sigurni da će nam beton biti otporan protiv korozije. Sigurno je da će biti

otporniji od onih portlanda koji su bogati sa C_3A i C_3S, ali veću otpornost ćemo sigurno postići upotrebom cementa s manjim procentom C_3A i C_3S, pomiješanim s odgovarajućom količinom pucolana ili zgure.

Kad govorimo o cementima sa smanjenim C_3A i C_3S treba paziti da ne dobijemo cemente s vrlo sporim stvrdnjavanjem i premalim konačnim čvrstoćama, jer ta dva minerala baš uvjetuju te karakteristike betona. Vidimo dakle kako poboljšavanjem betona u jednom pravcu pogoršavamo karakteristike u drugom, pa određivanje tih procenata zastupanosti minerala u cementu nije prosto i jednostavno, već vrlo složeno pitanje.

Mnoge naše cementare izrađujući portland-cement dodaju kod mljevenja klinkeru do 30% zgure, a da na to nigdje posebno ne upozoravaju, niti označuju na vrećama. Taj dodatak, kako smo već razmatrali, svakako vidno utječe na otpornost tog cementa u moru i izvođač bi trebao biti na to upozoren i to znati.

Mineraloški sastav otpornog portland-cementa niskoaluminatne i niskoalitne zastupanosti, prema ruskim laboratorijskim ispitivanjima, kretao bi se ovako:

C_3S	41 . . . 50%
C_2S	37 . . . 28%
C_3A	4 . . . 5%
C_4AF	15 . . . 17%

Iako su ovi procenti minerala dani samo orijentaciono, vidimo da zapravo postoje dva načina da smanjimo mogućnost stvaranja Candlotove soli u betonu.

Prvo, možemo klinker-sirovini dodavati dovoljno ferita, koji se prilikom pečenja spaja s aluminijevim oksidom i vapnom u bezopasan tetrakalcijev aluminoferit. Pri tom je poželjno da nam cement kod hidratacije ne oslobađa mnogo vapna, treba dakle nastojati da nam cement sadrži manje C_3S, a više C_2S.

Drugi se način sastoji u tome da vežemo oslobođeno vapno, bez kojeg se također ne može stvarati Candlotova sol. To postižemo, kako već znamo, dodavanjem pucolana ili zgure cementu. Kad se odlučimo za dodatak pucolana, tada treba također kontrolirati mineraloški sastav cementa. Ako je u cementu malo C_3A, već 10 . . . 15% pucolana dat će otporan beton, a ako imade oko 10% C_3A, može i sa 25% pucolana dati neotporne betone.

Može se sa sigurnošću tvrditi da pucolanski cementi i cementi s dodacima zgure optimalnog sastava daju sigurnije rezultate od portland-cementa u vezi s otpornosti protiv korozije morske vode. Pucolan u prvo vrijeme vezanja uvijek ima poteškoća pri absorbciji vapna, pa zato cementi uz dodatak pucolana u prvo vrijeme polako stvrdnjavaju. To je navelo mnoge da dodaju pucolanskim cementima neke akceleratore. Ako je brzo stvrdnjavanje u kojem slučaju važno može ga se primijeniti, ali uz oprez pri izboru akceleratora. Baš radi te osobine pucolana da u prvo vrijeme sporije stvrdnjava mnoge su zemlje propisale da se mjerodavna čvrstoća betona spravljenih s pucolanskim cementom ispituje nakon 90 dana.

U poglavlju o pucolanima prikazano je kako se teško može odrediti koliko se u kojem momentu nalazi oslobođenog vapna u betonu i koje za-

preke tome leže na putu. To je razlog zbog kojeg se isto tako teško može računski odrediti optimalna dosaža pucolana.

Zadatak pucolana nije samo da veže slobodno vapno, već i da ga veže odmah čim se ono stvara. Dodavanjem više pucolana od optimalne količine kvarimo beton jer mu se smanjuje čvrstoća i brzina stvrdnjavanja, a samo se bez potrebe povećava količina inertne materije.

Pri određivanju optimalne količine pucolana ne igra ulogu samo težinski odnos pucolanskog dodatka, već i njegova reaktivnost i finoća mliva. Upravo finoća mliva je razlogom zbog kojeg se npr. lebdeći pepeo sve više počeo upotrebljavati kao pucolanski dodatak kod pomorskih radova.

Kod cemenata za podmorske radove vrlo je važna finoća mliva, jer sitna zrna pogoduju brzoj hidrataciji, a osim toga zatvaraju i najfinije kapilare pa time pridonose povećanju nepropusnosti. Dodavanje fino mljevene inertne materije može donekle također dovesti do zatvaranja kapilara, ali nikada onako kako to čine sitna zrna cementa. Zrno cementa koje se nađe u kapilari aktivno učestvuje u procesu hidratacije. Stvaranjem gela povećava zrno svoj volumen, i time čvrsto i potpuno sprečava prolaz i dizanje vode u kapilarama. Može se reći da cementi i s najsitnijim česticama, veličine ispod 5 mikrona, daju vrlo nepropusne betone, ukoliko su ispunjeni i svi ostali uslovi za izradu nepropusnog betona.

Od dva kemijski ista cementa onaj finijeg mliva dat će dakle nepropusniji beton, jer najsitnije čestice cementa brzo hidratiraju i odmah u početku zatvaraju kapilare betona.

Ako je cement grublje mljeven, kao npr. cement sa zgurom, dodatak 2...3% finog inertnog mliva donekle poboljšava nepropusnost betona. Efekt ipak nije onakav kao pri upotrebi fino mljevenog cementa iz već objašnjenih razloga. Ako se već dodaje fino mljeveni inertni materijal treba upotrijebiti onaj koji sadrži silicijski oksid, npr. fino mljeveni bentonit. Silicijski oksid stvara u betonu koloidan gel, a to pridonosi ugradljivosti betona i povećava njegovu nepropusnost. Dodavanjem bentonita ili fino mljevenih pucolana dobiva se radi spomenute gel-koloidne supstancije ljepljiva masa betona, koja se ne miješa s vanjskom vodom, te otežava ispiranje cementa. To je važno za betone koji se u svježem stanju spuštaju u more.

Ne smijemo se međutim zadovoljiti samo s pravilnim izborom otpornog cementa i misliti da onda mora i beton biti otporan. Uz ispunjenje tog uslova ne smije beton biti porozan i propustan za vodu, jer takav će beton brzo propadati, bez obzira na otporan cement, radi ispiranja slobodnog vapna i daljnjeg povećanja poroznosti. Takav će beton biti napadnut i u svojoj unutrašnjosti radi svoje poroznosti.

Budući da sam u poglavlju »Specijalne vrste cemenata za radove u moru« već govorio o cementima, na taj se problem ovdje neću više vraćati. Ovdje bih jedino želio razmotriti problem miješanja različitih vrsta cemenata kod radova u moru, jer se to pitanje često postavlja u praksi.

Osnovno je pravilo da kod radova u moru treba nastojati ne miješati cemente, i uvijek raditi s istim cementom. Imade slučajeva da neke cemente možemo miješati bez opasnosti kod radova na suhu, dok te iste mješavine u moru postaju vrlo neotporne.

Za armirani beton naročito je opasno mijenjanje vrste cemenata koji imaju različit sastav. Ako hidrometrijski stupanj otopine pH u okolini šipke armature po čitavoj dužini nije konstantan, može doći do elektrolitičkog napada na armaturu i do brze korozije čelika. S time ću se pozabaviti naknadno, u posebnom poglavlju. Ako smo prisiljeni, ili smo se iz bilo kojeg razloga odlučili, na miješanje različitih vrsti cemenata, pravilo je da proanaliziramo sastav svakoga od tih cemenata, pa ćemo na osnovi toga brzo doći do potrebnih zahljučaka. Pokazat ću to na nekoliko primjera.

Želimo miješati normalan portland i brzovežući cement. Sastav portlanda znamo. Glavni minerali su C_3S i C_2S, oni oslobađaju vapno i to C_3S brzo, a C_2S polagano i vrlo dugo. Brzovežući cement sadrži veći procenat C_3A, koji pridonosi brzom vezanju i stvrdnjavanju, ali konačne čvrstoće su umjerene i manje od onih portlanda.

Dodajemo li malo portlanda brzovežućem cementu povećati ćemo čvrstoću, ali i produžiti vrijeme vezanja i stvrnjavanja, a ako dodajemo malo brzovežućeg cementa portlandu ubrzat ćemo vezanje, ali ćemo smanjiti čvrstoću.

Ovakove reakcije imat ćemo kad radimo na suhu, tj. beton izvan mora. Ako bismo takav beton upotrijebili u moru bio bi on brzo razoren uslijed djelovanja Candlotove soli. Brzovežući cement ne oslobađa vapno za vrijeme hidratacija, ali je bogat na C_3A. Portlant-cement iako bi bio siromašan na C_3A, razvijat će brzo slobodno vapno hidratizacijom C_3S. Vidimo dakle da će doći do spajanja aluminata sa sulfatima iz mora u prisustvu vapnenog rastvora, dakle do stvaranja Candlotove soli. Do takvog bi razaranja moglo doći i ako bi se u moru nalazila u blizini dva betona, jedan izrađen s portlandom, a drugi od brzovežućeg cementa, naročito ako su betoni porozni i propusni.

Sličan slučaj bismo imali miješanjem metalurgijskog cementa i portland-cementa ili kad bi se betoni od ta dva cementa nalazili u moru jedan blizu drugoga. Metalurški cement siromašan je na vapnu, koje se brzo veže za zguru, a bogat je na C_3A, dok portland-cement oslobađa vapno, a siromašan je na C_3A. Beton metalurškog cementa brzo će propasti radi stvaranja Candlotove soli iz istih razloga kao u prvom slučaju.

Miješamo li portland-cement s pucolanskim cementom mješavine će to brže vezati što je dodano više portlanda, ali će zbog istog razloga biti i to manje otporan u moru.

Treba također paziti da se beton aluminoznog cementa ne nalazi u blizini betona portland-cementa u moru, naročito ako vodene struje teku od portiand-cementnog betona prema aluminoznom. Oslobođeno vapno portlanda rastvoreno u vodi djeluje na beton aluminatnog cementa te dolazi do rekristalizacije, a time do gubitka čvrstoće i propadanja tog betona.

Ako ne možemo izbjeći da nam se u moru u blizini nađu betoni različitog sastava cementa, općenito se može reći da u tom slučaju treba posvetiti naročitu pažnju da ti betoni budu gusti i nepropusni za vodu. Time se sprečava infiltracija vapna koje ne može tako lako prodirati kroz nepropustan beton, a otežan je i ulazak sulfatima u beton, pa će takvi gusti betoni na taj način ostati otporni protiv korozije.

Paralelno, istovremeno betoniranje u moru različitih vrsta betona, treba izbjegavati radi gore spomenutih negativnih pojava. Iz svih dosadanjih

izlaganja vidi se da trajan i otporan podmorski beton mora da bude gust. Za izradu gustog i nepropusnog betona jedan od osnovnih uslova je da je bogat na veznom sredstvu. Često se nastojalo i drugim sredstvima, dobrim granulometrijskim sastavom, te povišenim dodatkom pijeska i mineralne prašine, postići gust i kompaktan beton. Takav beton može biti i gust, ali bez dovoljne količine cementa on neće biti otporan protiv agresije morske vode i postat će porozan a time i male trajnosti. Veće količine cementa potrebne su nam da spriječimo prodiranje mora koje djeluje pod pritiskom, da omogućimo zatvaranje kapilara sitnim česticama cementa i da dobijemo nepropustan beton.

Naši PTP za pomorsko-građevne radove predviđaju za beton koji se spušta u more u svježem stanju smjesu od 350 kg pucolanskog cementa na 1 m³ kamena agregata, što odgovara 385 kg pucolanskog cementa na 1 m³ gotova betona.

Njemačke smjernice za izradu betonskih radova u moru propisuju za beton koji se spušta u more u svježem stanju 450 kg cementa.

Budući da se kod radova u moru često radi o velikim masama betona koje su kasnije vrlo nisko napregnute, čuo sam i od tehničara koji nisu radili na pomorskim gradnjama prijedloge da se smanji dosaža cementa, jer bi se time postigle znatne uštede. Takvo gledanje sasvim je pogrešno i takva štednja brzo bi se osvetila, jer troškovi popravka, odnosno obnove, bili bi brzo mnogo veći od zamišljene uštede. Izrađuje li se podmorski beton, koji se svjež spušta u more, sa 250 ... 300 kg cementa dobit ćemo loš i neotporan beton, bez obzira na kvalitet i odlike izabranog cementa i način rada.

Za spravljanje otpornog i gustog betona vidimo da osim dobro izabrane vrste cementa važnu ulogu igra i pravilno doziranje cementa. Vršeni su pokusi s betonom bogato doziranim sa oko 500 kg cementa koji inače potpuno ne odgovara za pomorske radove, te s betonom spravljenim sa 300 kg cementa vrlo otpornog na koroziju morske vode. Ispitivanja su vršena tokom dužeg vremenskog perioda u slobodnom moru. Prvi beton bogatiji na cementu pokazao je daleko bolje rezultate i bio je otporniji od onog drugog koji je bio spremljen s manje cementa, iako otpornijeg.

Pri spravljanju otpornog betona, koji se svjež spušta u more, trebalo bi uzeti kao pravilo dodavanje cementa od 400 do 450 kg na m³ gotova betona. Ni uz upotrebu metalurškog portland-cementa ne može se dobiti otporan beton za radove u moru kad bi bio doziran sa 250 kg/m³ betona. Ako dodamo premalo cementa ili previše vode ne pomažu nam ni plastifikatori da dobijemo nepropustan beton. Kao zaključak moglo bi se reći da podmorski beton mora da bude gust, nepropustan i bogat veznim sredstvom.

Dosadanjim razmatranjem problema dodavanja cementa pri izradi otpornog podmorskog betona vidimo da je raspon koji određuju različiti propisi ili priznati autoriteti dosta velik, od 350 ... 500, pa i više kg.

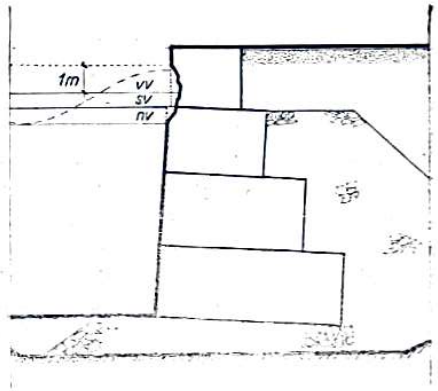
Projektant u prvom redu treba da zna kako u kojem slučaju mora da postupi. Najprije treba da ocijeni kako će objekt, ili dio građevine, biti napadan korozijom mora, već prema položaju gdje se nalazi. Nadalje treba da razmisli od kakve je važnosti pojedini dio građevine, odnosno što uzrokuje brže propadanje takvog dijela, i s koliko troškova bismo ga mogli popraviti. Pri tom odlučuju i dimenzije pojedinog dijela.

Ako projektiramo dijelove građevine važne za čitav objekat, dijelove manjih dimenzija, dijelove jače napadane, predvidjet ćemo siguran i vrlo otporan beton. Uz ispunjenje svih ostalih uslova o kojima ću dalje govoriti, odredićemo doziranje cementa sa 450 ... 500 kg na 1 m³ betona. U ostalim slučajevima možemo predvidjeti 400 ... 450 kg cementa, a samo za nevažne, manje objekte snizili bismo tu količinu na 350 kg.

Prema našim PTP za podmorske se radove predviđa da beton nadmorskog dijela zida bude izrađen od 300 kg portland-cementa na m³ agregata. Naši propisi nisu u skladu s dosadanjim razlaganjem tamo gdje je zona plime i oseke pokazana kao jako napadana fizikalno-kemijskim i mehaničkim silama. Do tog protuslovlja s propisima mislim da nije došlo zbog principijelnih gledanja, već zbog nedovoljno protumačenog pojma »nadmorski zid«.

Pod zonom plime i oseke podrazumijeva se dio obalnog zida od nivoa niske oseke do visine visoke plime, uvećane za oko 1,0 m radi djelovanja valova i kapilarnosti betona. Maksimalne plime i oseke koje rijetko nastupaju ne uzimaju se u obzir. Ako bi na dotični objekat udarali česti valovi, trebalo bi to uzeti u obzir pri određivanju opasne zone.

Beton u toj tzv. zoni plime i oseke treba izraditi najmanje sa 450 kg pucolanskog ili kojeg drugog otpornog cementa. Kako taj dio zida za vrijeme oseke već možemo ugrađivati u suhu, najbolje je beton ugrađivati vibratorima, jer tako možemo smanjiti vodocementni faktor i dobiti gust i nepropustan beton.



Sl. 33

Oplata treba da bude solidno izvedena, sa zabrtvljenim spojnicama, da ne dođe do ispiranja za vrijeme dizanja mora.

Ako objekat gradimo u predjelu gdje dolazi i do čestog smrzavanja, odnosno otkravljivanja u zoni plime i oseke, pucolanski cementi ne osiguravaju dovoljnu otpornost protiv smrzavanja, pa je bolje upotrijebiti sulfatno otporne portland-cemente s malim sadržajem trikalcijeva aluminata i ne previše trikalcijeva silikata. U ovim slučajevima vrlo je dobro betonu dodati i koje sredstvo za aeriranje.

Dio zida iznad linije opasne zone, koji rijetko zapljuskuje more, može se izvoditi i portland-cementom prema našim propisima. Osim toga dio obale od visine srednje vode, ako ne i od visine oseke, oblaže se baš radi tih jakih napadaja mora najčešće kamenim obložnicama. Iza kamenih obložnica, do visine prosječnih visokih plima, može se izvesti sa 350 ... 400 kg pucolanskog cementa ili s portland-cementom kvaliteta otpornih za pomorske radove. Tek iznad te visine može se izvoditi radove s normalnim portland-cementom, jer se u betonu zaštićenom s kamenim obložnicama ne treba

bojati nagomilavanja soli u kapilarama, budući da ne može doći do jakog zagrijavanja i sušenja betona.

Ako izrađujemo betonske blokove koji se nakon stvrdnjavanja na suhu ugrađuju u obalne zidove, dodatak cementa može biti nešto manji nego za betone koji se svježi spuštaju pod more. Naši propisi dopuštaju izradu takvih blokova sa 300 kg pucolanskog cementa na 1 m³ agregata, što odgovara 330 kg cementa na 1 m³ gotova betona. Najnovija iskustva preporučuju da se ne ide ispod 350 kg pucolanskog cementa za 1 m³ gotova betona. Beton treba svakako ugrađivati što težim vibratorima kako bismo mogli upotrebljavati krupniji agregat. Način upotrebe vibratora opisan je u poglavlju o vibriranju betona. Vodocementni faktor betona treba također da je što niži, kako bismo dobili što nepropusniji beton. Dobro je u beton dodavati neki aerans da bi se još više povisila ugradljivost, smanjio dodatak vode, i povećala otpornost betona. Pravilnim vibriranjem i dodatkom aeransa smanjuje se i skupljanje betona, što je od velike važnosti za objekt.

Kad bi se izradi betona posvetila naročita pažnja, koristeći sve prednosti dobre granulacije, sa što većim zrnima najkrupnijeg agregata koji još možemo efikasno vibrirati s teškim vibratorima, te upotrebom aeransa i niskog vodocementnog faktora, moglo bi se uštediti cement i izrađivati beton sa 300 kg pucolanskog cementa. U beton blokova ne preporučujem ubacivanje većeg kamenja jer se onemogućuje pravilno vibriranje, postoji opasnost brzog uništavanja vibratora, i dobiva se nehomogen presjek betona sa šupljim neispunjenim prostorima ispod velikih komada kamenja. Gotove betonske blokove treba dobro vlažiti prve tri sedmice. Gotove blokove dobro je čim dulje ostaviti na suhu, jer što je beton stariji to je otporniji protiv agresivnog djelovanja morske vode. Spuštanje blokova u more ne smije uslijediti prije nego što je beton blokova odležao na suhu najmanje trideset dana, ali je bolje, ako je to moguće, da stvrdnjavaju na zraku šest i više mjeseci. Ako bi se ukazala potreba da se blokovi prije toga roka polažu u more, potrebno je umjetnim putem ubrzati karbonizaciju. To postižemo ako bloku dovodimo CO_2, ali bezuslovno uz prisustvo optimalne količine vlage.

Proces karbonizacije vrši se tako da blokove parimo na temperaturi od 60...80 °C, uz prisustvo CO_2.

$$Ca/OH/_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O$$

Parenje traje 8...12 sati.

Ako je beton izložen djelovanju morske vode on mora da bude gust, kompaktan i nepropustan. Možemo tvrditi da nema tog cementa, koji bi bio otporan protiv izluživanja ako je beton porozan i ako je omogućen stalan pristup agresivnoj vodi. Općenito se može reći da su osnovne osobine podmorskog betona nepropusnost i otpornost prema izluživanju. Ako beton ispunjava ove uvjete, a spremljen je prema načinima o kojima je već bilo govora, sigurno će zadovoljiti i uvjete tražene čvrstoće.

Agregat mora da bude zdrav i otporan protiv kemijske agresije morske vode.

O granulometrijskom sastavu i količini vode za miješanje govorio sam u ranijim poglavljima, kako za beton blokova, tako i za betoniranje kontraktorom, pa se na to više neću vraćati.

Ovdje bih želio još jednom spomenuti važnost gustog i nepropusnog betona sačinjenog sa što je moguće manje vode, ali da bude još uvijek dovoljno ugradiv. Ako je masa betona nehomogene mješavine i s previše vode može za vrijeme transporta doći do segregacije, a time bismo dobili nekvalitetan i propustan beton.

Beton vlažan kao zemlja teško ćemo ugraditi da bude nepropustan, pa treba ići na poluplastične mješavine slijeganja konusa 3...5 cm. Treba nastojati podmorskom betonu dodavati što manje vode, ali ipak toliko da ugradljivost bude bezprijekorna. Pri tome treba svakako voditi računa o vlažnosti pijeska i agregata, jer kako smo vidjeli te količine vode mogu biti znatne i mogu sasvim izmjeniti traženi vodocementni faktor.

Problemu dodavanja više vode nego što je potrebno redovito se ne posvećuje dovoljno pažnje ni od strane nadzora.

Betonirci iz razumljivih razloga uvijek vole dodavati više vode, jer je onda lakše ugrađivanje betona. To je tako reći opća pojava i trebalo bi je oštrije suzbijati nego što se to redovito čini. Mi smo do sada vidjeli kako utječe vodocementni faktor i što znači njegovo povećanje za čvrstoću i ostale karakteristike betona. Povećanje količine vode po važnosti je istog reda kao i smanjenje dodane količine cementa. Iako to znamo, nadzorni organ daleko strožije kontrolira propisno doziranje cementa, nego vode. Znajući to, moramo imati uvijek na umu što činimo betonu dodajući više mu vode nego je potrebno, pa će nam beton biti jači, otporniji i trajniji.

Da se smanji dodatak vode a da ugradljivost bude ipak dobra upotrebljavaju se različiti plastifikatori. Kod nas se zbog bolje ugradljivosti prije dodavalo betonu gašeno vapno. I naši PTP za pomorske radove dopuštali su dodatak od 25 kg gašena vapna radi bolje ugradljivosti.

Prema onome što smo do sada razmotrili o potrebnim karakteristikama cementa, odnosno betona za pomorske radove, tj. da trebaju biti siromašni na vapnu, vidimo da je ta preporuka u suprotnosti s današnjim saznanjima i iskustvima.

U prvoj fazi, tj. kod ugrađivanja, dodatkom vapna dobivamo plastičniji beton koji bolje teče kroz kontraktorsku cijev, ali kasnije takav beton postaje brzo porozan radi velikog izluživanja, te naglo propada. Prema tome vapno se za podmorski beton ne smije upotrebljavati kao plastifikator.

Kad govorimo o vodonepropusnosti betona moramo razlikovati jaku poroznost od kapilarnosti. Beton može biti porozan već od početka, tj. kada je otvrdnuo, ili to postaje kasnije. Prvi slučaj nastaje ako je granulometrijski sastav agregata takav da u mješavini ima mnogo šupljina, a morta premalo, pa da te šupljine sigurno ispuni. Pri tome ne mislim na »porozne betone«, za koje svjesno želimo da budu takvi. Isto tako možemo dobiti porozan beton ako smo ga miješali s previše vode. Voda koja ostaje u betonu nakon hidratacije sakupljena je u kapljicama ili vrećicama ispod krupnijeg agregata. Kasnije se ta voda ispari, u betonu ostaju šupljine, i kažemo da je beton porozan. Ma kako gust beton izradili stanoviti procent pora ipak postoji u betonu. Pokusima je ustanovljeno da šupljinice u cementnom tijestu zauzimaju 25...40% ukupnog volumena. Taj prosjek mikropora i kapilara cementnog tijesta otprilike je isti i u dobro izrađenu betonu. Ovdje ne smije doći do zabune. Procent šupljinica u betonu ili cementnom tijestu ostaje isti za cementno tijesto. Ispitivao se utjecaj ispune na procent pora cement-

nog tijesta. Ako nas interesira procent šupljinica gustog betona, ukoliko poznajemo procent poroznosti cementnog tijesta, to ćemo izračunati na ovaj način: Ustanovljene šupljinice u cementnom tijestu neka iznose npr. 25%. Beton je izrađen u smjesi 1 : 4.

$$\text{Poroznost betona } p_b = \frac{p_c}{1+n} = \frac{25}{5} = 5\%$$

Tako izrađene betone nazivamo mikroporoznima, jer njihova poroznost ovisi samo o mikroskopskim porama i kapilarama u cementnom tijestu, uz pretpostavku da su ostale šupljinice eliminirane dobrim izborom agregata i granulometrijskog sastava, ugradbom itd. Iz gornje formule vidimo da veća količina cementa tj. masniji betoni, daju veći procent pora, dali bi dakle i propusniji beton. To je zapravo i razumljivo. Kod veće količine dodanog cementa dobivamo veći procent vrlo finih mikroskopskih kapilarica i pora, koje međutim ne moraju dati i propustan beton. Vanjska voda prodire pod pritiskom i difuzijom u te fine kapilarice do potpuna zasićenja, ali voda ne prodire kroz beton. Beton ostaje samo vlažan. Kapilare većeg presjeka, koje omogućuju kretanje vode, stvaraju komunikaciju za prolaz vode, što je najčešće rezultat prevelikog dodavanja vode za miješanje. Da bi se postigao nepropustan beton treba dakle paziti da se dodaje čim manje vode. Može se međutim izraditi i gust i homogen beton, koji kasnije postaje jače porozan. To je čest slučaj baš kod podmorskog betona. Ako nam je cement bio bogat vapnom dolazi u moru do izluživanja, odnosno ispiranja oslobođena vapna, i beton postaje sve porozniji i sve brže propada.

Kada dakle govorimo o vodonepropusnosti, uslov je da takav beton nije porozan ili da je vrlo malo porozan. Ako pak imamo dva betona jednake poroznosti, dakle i jednake nepropusnosti za vanjsku vodu, oni ne moraju biti i jednako higroskopni. Higroskopnost betona vezana je za njegovu kapilarnost. Možemo dapače kazati da je za vanjsku vodu, koja djeluje pod pritiskom, nepropusniji onaj beton koji je više higroskopan.

Podmorski beton treba da je nepropustan, ako tražimo da bude otporan, pa prema tome ne smije biti porozan. Kapilarnost betona važna je samo u zoni plime i oseke, naročito u onim klimatskim uslovima gdje može doći do smrzavanja ili jakog isparivanja kapilarne vode. Jedan i drugi slučaj podjednako i slično razara beton. Ako su dimenzije presjeka kapilara velike, da voda u njima ne može stvoriti meniskus, dolazi do ishlapljivanja vode i kapilara se polako suši. Sitnije kapilare potpuno su ispunjene vodom. Prema Freyssinetu, kapilare gube svoju vodu to brže, što je viša temperatura, i što im je veći dijametar presjeka. Uz ove uslove, Freyssinet tvrdi da će beton i pod vodom izgubiti kapilarnu vodu ako mu je temperatura viša od temperature vode, i ako nije dovoljno gust.

Mogli bismo kazati i ovako: što je beton porozniji, manje je kapilaran, odnosno što je nepropusniji, više je kapilaran. Kada smo postigli beton minimalne poroznosti, nepropusnost ovisi o finoći kapilara. Ako su kapilare vrlo fine, dakle vrlo malog presjeka, kažemo da je beton higroskopan, jer

znamo da je kapilarni vlak to veći, odnosno da se voda u kapilarama diže to više, što je presjek kapilara manji.

Time postaje jasno zašto se za izradu podmorskog betona preporučuje upotreba cementa visoke finoće mliva. Čestice takvog cementa ulaze u najfinije kapilare, jer su dijametra 5 ... 10 mikrona. Ta zrnca brzo hidratiraju, pri čemu povećavaju svoj volumen i potpuno zatvaraju, odnosno presjecaju kapilare i tok vode kroz njih.

Ima slučajeva da neki autori preporučuju radi postizavanja veće gustoće dodavanje betonu prašine vapnenca, kako bi se štedio cement. Vapnena prašina traži i veću količinu vode, što je nepoželjno zbog povećanja vodocementnog faktora, a osim toga vapnena prašina pojačava kod betona u moru bujanje sadre, što lako dovodi do razaranja betona.

Kao zaključak svega što je do sada rečeno o izradi trajnog i otpornog betona za podmorske radove moglo bi se kazati ovo: Treba nastojati upotrebljavati otporne i odgovarajuće cemente, ali uz uslov da izrađeni beton bude gust i kompaktan, uz bogato doziranje cementa, a uz onaj minimalni dodatak vode, da ipak bude postignuta homogenost mase betona i dobra obradivost.

Možemo uopće reći da je gustoća betona za podmorske radove njegova najvažnija fizikalna karakteristika, a kako ona u mnogome ovisi o nama, moramo upotrijebiti sve svoje znanje da konstantno postižemo takav beton.

Ako sam ovim djelom uspio mlađe kolege navesti na razmišljanje što znači za podmorski beton mineraloški sastav i bogata doza cementa, stroga kontrola dodatka vode, te pravilan izbor i sastav agregata, uz pridržavanje svih pravila ugrađivanja betona, ispunio sam zadatak koji sam sebi postavio.

Graditi u moru težak je i odgovoran zadatak. Ako želimo da gradimo trajne i ekonomične objekte moramo se strogo pridržavati najnovijih iskustva iz prakse i nauke, te prateći njihov napredak, stalno bogatiti svoje znanje i korisno ga primjenjivati u praksi.

UPOTREBLJENA LITERATURA

M. Duriez: *Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments.* Travaux, br. 3 ... 7, 1953.

J. Brocard: *La corrosion du beton.*

V. V. Kind: *Korozija cemenata i betona u hidrotehničkim objektima.*

I. A. Voronov: *Morskie sooruženiy iz betona i železobetona.* Moskva, 1950.

W. Kronsbein: *Über das Verhalten der Zemente in Meerwassern.*

A. Kleinlogel: *Einflüsse auf Beton.*

E. Mörsch: *Der Eisenbetonbau.*

J. Kavčič: *Pogoji in vzroki nastanka korozije betona iz portland cementa.* Posvetovanje o zaščiti betona in betonskih konstrukcij. Ljubljana, 1960.

PTP za pomorsko-građevne radove, 1951.

KOROZIVNO DJELOVANJE MORSKE VODE NA ČELIK ARMIRANOG BETONA

Ako promatramo korozivno djelovanje morske vode na armirani beton sukobljavamo se s teškim i delikatnim problemima. I tu, kao i kod masivnog betona, osnovno je pravilo da beton bude gust, homogen, nepropustan i bogato doziran veznim sredstvom. Kako je međutim beton u praksi nemonolitan, pa je i uz najveću pažnju različite strukture od presjeka do presjeka, teško je sa sigurnošću izraditi tanak sloj nepropusnog betona koji pokriva čeličnu armaturu.

Osim defekata pri ugrađivanju, naime da nam mjestimice ostaju prazni prostori ispod armature, može doći, uz eventualno suhu oplatu, do prevelikog upijanja vode iz betona ili djelovanja efekta zida, što sve povlači za sobom nehomogenu strukturu smanjene čvrstoće ili stvaranje pukotina u betonu. Sve te poteškoće i nesigurnosti stvorile su kod velikog broja stručnjaka uvjerenje da armirani beton treba za pomorske radove izbjegavati. Međutim unatoč velikim teškoćama, ako se pridržavamo svih propisa, a naročito ako koristimo sve tekovine modernog građenja, možemo izvesti u moru građevine od armiranog betona koje će biti trajne i odgovarati svojoj svrsi. Imamo primjera dobro izvedenih armirano-betonskih građevina u moru, koje uz normalno održavanje služe svrsi već 50 i više godina.

Što se tiče izrade i kvaliteta betona to više neću ponavljati. Ako se betonira na suhu, treba svakako raditi s vibratorima, da na taj način smanjimo količinu dodane vode, a time i poroznost betona.

Zaštitni sloj betona koji pokriva armaturu mora da ima debljinu najmanje 4 do 5 cm, jer sloj betona od 1 do 2 cm praktički se ne može izvesti nepropustan. A nepropusnosti i kvaliteti zaštitnog sloja ovisi uvelike i trajnost konstrukcije, jer kod armiranog betona, osim svih do sada nabrojenih napada morske vode, javlja se još jedan i to vrlo opasan faktor, a to je rđanje armature.

Čelična armatura uz prisustvo vlažnoga zraka oksidira stvarajući željezni oksid ili rđu na površini. Rđa prodire sve dublje u presjek čelika i tako ga postepeno razara. Stvaranjem rđe ne uništava se samo armatura i njena nosivost, već stradava i beton. Stvaranjem rđe 2 do 2,5 puta se povećava volumen čelika, uslijed čega dolazi do pucanja zaštitnog sloja betona.

Na površini betona pojavljuju se karakteristične pukotine u smjeru armature, dakle uzdužne pukotine, kroz koje uskoro izlaze na površinu rđaste mrlje. Stvaranjem pukotina otvara se put vodi i zraku, a time i proces razaranja postaje brži. Voda se duže zadržava uz čelik nego u slučaju kada je armatura slobodna, gdje se npr. nakon kiše na zraku brzo osuši.

Pukotine nastale iz bilo kojeg uzroka treba izbjegavati. Smatra se da pukotine šire od 0,20 mm postaju već opasne za agresiju u blizini mora. Pukotine u armirano-betonskim konstrukcijama možemo dijeliti na one koje su nastale uslijed grešaka u statičkom računu ili izvedbi, i na one koje nastaju kod normalnog rada same konstrukcije. O prvima neću govoriti, njih treba bezuslovno izbjegavati, a to je i moguće. Druge moramo očekivati, ali treba nastojati da bude više sitnih mikropukotina, a ne da se koncentriraju na nekoliko debljih i opasnih. To postižemo tako da konstrukciju armiramo s više tanjih šipki, a ne sa malo debljih, te da ih usmjerimo što više prema smjeru glavnih trajektorija. S naprezanjem čelika ne smijemo ići previsoko, trebali bismo se zadržati od 1000 do 1200 kp/cm², da vlačna naprezanja betona ne budu prevelika.

Smanjenje dopuštenih vlačnih naprezanja čelika i podebljanje zaštitnog sloja betona poskupljuje konstrukciju, ali to je još uvijek jeftinije od čestih sanacija i održavanja objekta.

Prednapregnuti beton sa svim svojim dobrim osobinama, a naročito kvalitetnim betonom i, uz pravilnu izvedbu, nemogućnosti nastajanja pukotina, nalazi svoju punu primjenu baš u pomorskim radovima. I kod primjene prednapregnutog betona trebaju i projektant i izvođač voditi računa o svim mogućnostima napada morske vode, te naročito paziti da se posve i sigurno spriječi korozija čeličnih žica. Uz rigorozan rad to nije neprovedivo, a imamo materijal koji je ekonomičan i prilagodiv za sve moguće oblike i slučajeve. Kako smo već rekli, za proces rđanja potrebno je prisustvo zraka, odnosno kisika i vode. Prema tome dijelovi armirano-betonskih konstrukcija koji su trajno pod morem ne korodiraju od rđanja armature, jer nemaju potrebna kisika. O koroziji u moru govorit ću kasnije. Praksa je pokazala da rđanje armature u pomorskim objektima najviše i najjače nastupa u nadvodnoj zoni, manje u zoni između plime i oseke, a vrlo malo ili nikakvo u razini oseke. Ovo nas navodi na oprez budući da i kod armirano-betonskih konstrukcija u blizini mora, gdje postoji mogućnost da vjetar nosi kapljice vode do objekta na kome se one suše i ostavljaju sol koja je higroskopna, dolazi do pojačane korozije armature.

Beton armirano-betonskih konstrukcija u blizini mora treba izrađivati sa slatkom, a ne morskom vodom, jer higroskopnost betona uslijed prisustva NaCl pojačala bi mogućnost rđanja armature. Kao dalnje opažanje navodim da je rđanje to intenzivnije, što je salinitet veći, ali difuzija soli u beton postaje opasna tek kada beton počinje pokazivati znakove raspadanja.

U samom moru, gdje kisik nema pristupa, ne dolazi do rđanja. Ali ni tamo nismo sigurni od napadaja na armaturu. U moru može doći do *elektrolitske korozije armature* koja je također opasna, iako do danas slabo istražena.

Primijećeno je da katkada dolazi do korozije armature ako se armirano-betonski elemenat nalazi u moru, te ako je beton homogen i gust, izrađen s velikom dozom cementa. Dugotrajnim istraživanjem opazilo se da se to događa samo onda kad nisu ispunjeni stanoviti uvjeti, uslijed čega dolazi do elektrolitske korozije.

Poznato je da se galvanski članak sastoji od dvije elektrode, anode i katode, uronjene u elektrolitsku otopinu. Elektrode su vodiči, od kojih jedna

mora da bude metal i ta je anoda. Ako su obje elektrode metalne onda je anoda manje plemenit, a katoda plemenitiji metal. Može doći do djelovanja galvanskog članka, iako su oba elektrolita od istog metala, ali različite otpornosti. Dio koji je manje otporan bit će anoda i njeni se ioni odcjepljuju, dok je katoda otpornija i zadržava svoje ione.

Ako sada razmotrimo što se zbiva u armirano-betonskom elementu uronjenom u more vidjet ćemo postojanje sličnih uvjeta kao u galvanskom članku, te pojavu elektrolitskih djelovanja, koja se ispoljuju u koroziji armature.

Nabrojat ću nekoliko uvjeta koji izazivaju elektrolitsku koroziju.

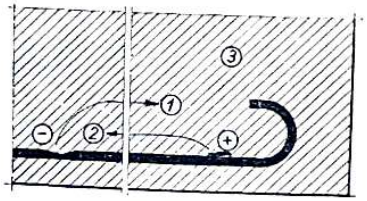
U svim slučajevima morska je voda elektrolitska otopima, koja ulazeći i u fine kapilare gustog betona stvara vlažan beton, koji kao takav postaje vodič, odnosno elektrolit.

Može dakle nastati galvanski članak, u kojem je vlažan beton katodni, a armatura anodni elektrolit, koji korodira.

Drugi slučaj elektrolitskog napada nastupa ako je čelična šipka u vlažnoj okolini mjestimice različita sastava. Dio manje otporan djelovat će kao anoda koja korodira, a dijelovi otporniji kao katoda. Da izbjegnemo ovakve slučajeve korozije preporučljivo je armirano betonske konstrukcije koje dolaze u doticaj s morem armirati s kraćim šipkama armature, jer kod dužih je šipki bez prekida veća vjerojatnost heterogenog sastava čelika. Daljnja opasnost elektrolitske korozije jest rđa na čeličnoj armaturi. Rđa, ili željezni oksid, vrlo je otporan i dolazi do heterogenosti sastava koji izazivaju elektrolitske pojave. Poznato je da manje naslage povećavaju prionljivost armature u betonu i da takovu rđu koja se ne ljušti ne treba čistiti s armature kod objekata na suhom.

Ako armirano-betonska konstrukcija ulazi u more armatura treba da bude posve očišćena od rđe.

Nadalje treba paziti da čelična šipka po čitavoj svojoj dužini bude uronjena u beton izrađen od istog cementa i istog sastava betona. Ako smo upotrijebili dva cementa različita sastava neće nam biti hidrometrijski stupanj pH okolne otopine jednak uzduž čelične šipke, pa opet dolazi do elektrolitske korozije čelika. Najsigurnije sredstvo za zaštitu armature od ove korozije jest ako se armatura nalazi u alkalnoj sredini, npr. vapnu. Slobodno vapno oko čelične šipke brani čelik od elektrolitske korozije. Iz ovoga slijedi naoko čudan zaključak: za otporne armirano-betonske konstrukcije u moru treba upotrijebiti cemente koji nisu siromašni na vapnu.



Slika 34. Elektrolitska korozija čelika u vlažnom betonu uronjenom u morsku vodu: 1 — smjer strujanja kationa; 2 — smjer strujanja aniona; 3 — beton uronjen u morsku vodu, elektrolit; — čist čelik, anoda; + rđa, katoda

Iz toga najbolje vidimo kako su mnogobrojni i raznovrsni razorni utjecaji morske vode, te kako je teško, kompleksno ih uzevši, boriti se protiv njih. Ta raznovrsnost agresije kojoj moramo odoljeti, a koja često izaziva i suprotne mogućnosti obrane, ukazuje na težinu tih problema, koji još do danas nisu u potpunosti riješeni. Kad govorimo o otpornom armiranom betonu u morskoj vodi moramo misliti na otpornost betona u vezi s kemijskom, fizikalnom i mehaničkom agresijom mora, a ujedno posvetiti pažnju i elektrolitskoj koroziji čelika. Jednostrana obrana dala bi loše rezultate na drugoj strani.

Već smo upozorili na to da slobodno vapno oko čelične šipke brani čelik od korozije. Opazilo se da ako dođe zrno kremena u direktan dodir s čeličnom šipkom, na tom će mjestu početi korozija čelika. To nastupa onda ako zrno kremena sadrži aktivnog silicijskog oksida koji absorbira slobodno vapno i tako omogućuje korozivni napad na tom mjestu. Vidimo dakle da kremeni pijesak nije podesan za armirano-betonske konstrukcije, ako se nalaze u takovim uvjetima gdje lako dolazi do rđanja.

Daljnjom analogijom dolazimo do zaključka da i pucolanski cement ili cementi zgure, koji obiluju pucolanom, odnosno zgurom, nisu podesni za armirano-betonske konstrukcije, jer se njihovo djelovanje sastoji u tome da odmah vežu slobodno vapno koje se stvara za vrijeme hidratacije.

Uzevši sve to u obzir, otporni armirani beton u moru najbolje je raditi s portland-cementom otpornim prema morskoj vodi. I u tom slučaju treba da je dozaža cementa bogata, da beton bude vrlo gust, homogen i izrađen sa što je moguće manje vode. Kako je kod armiranog betona i čvrstoća vrlo važna karakteristika, treba i o tome voditi računa.

Da postignemo tražene čvrstoće, ali i gustoću i nepropusnost, bolje je upotrebljavati cemente manjih čvrstoća u većim količinama, nego uzeti cement velike čvrstoće, koji i u manjim količinama daje traženu čvrstoću betonu.

Osim spomenutog otpornog portland-cementa može se s uspjehom upotrijebiti i metalurški cement, ali samo onaj kojega su klinker i zgura miješani u omjeru oko 50 : 50%. I pucolanski portland-cement može se uspješno upotrebljavati, ali i tu treba paziti da se ne dodaje previše pucolana, a premalo klinkera. Dodatak pucolana neka ne prelazi 25%.

Dakle, pri izradi armirano-betonskih konstrukcija u moru treba raditi s najvećim oprezom. Beton mora da bude gust, homogen i nepropustan, dozaža cementa bogata, rad sa što manje vode, ali da beton bude nepropustan i armatura dobro zalivena. Po mogućnosti ugrađivati beton vibratorima. Naročito treba paziti da ne dođe do segregacije i stvaranja gnijezda od većeg agregata

Treba voditi računa o efektu zida. Nikako ne upotrebljavati dvije vrste cementa, izbjegavati čelične šipke prevelike dužine bez prekida. Gotovu konstrukciju dobro, snažno i trajno močiti barem 3 do 4 tjedna, jer treba misliti nato da bogato doziranje cementa izaziva snažno skupljanje betona, pa bi konstrukcija mogla dobiti pukotine još prije upotrebe.

Na kraju bih još spomenuo da armirani beton uslijed loše izvedbe ne smije ni u kojem slučaju ostati porozan, s ogoljelom armaturom ili gnijezdima agregata ispod armature. Takav rad omogućuje moru da dođe u direktan kontakt s armaturom. Budući da se morska voda stalno obnavlja

doći će do izjedanja i korozije čelika. U poroznom betonu u moru dolazi do hidrolize silikata i aluminata, te difuzije slobodna vapna. Time se je hi.. drometrijski stupanj vode u betonu spustio ispod stanovite vrijednosti i lako dolazi do korozije čelika. Ovakve greške samo spominjem, ali ih neću dublje obrađivati, jer osnovno je načelo za armirani beton u moru da nije porozan, već gust i nepropustan, pa to osnovno pravilo ni u kojem slučaju ne smijemo zanemariti.

UPOTREBLJENA LITERATURA

M. Duriez: *Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments.* Travaux, br. 3...7, 1953.

V. V. Kind: *Korozija cementa i betona u hidrotehničkim objektima.*

I. A. Voronov: *Morskie sooruženiy iz betona i železobetona.*

D. Jejčić: *Poškodbe betona zaradi mehanskih vplivov.* Posvetovanje o zaščiti betona in betonskih konstrukcij, 1960. g.

ZAKLJUČNI PREGLED IZBORA VRSTE CEMENTA I IZVEDBE OTPORNOG I TRAJNOG BETONA ZA RADOVE U MORU

Ovdje želim ukratko ponoviti sve ono što je važno za izradu trajnog betona kod radova u moru. Sva tumačenja ovih zaključaka dana su ranije, pa ih neću ponavljati, jer ih svatko može naći u poglavljima specifične tematike.

Kako normalan portland-cement nije uopće otporan na kemijske promjene ne preporučuje ga se upotrebljavati, naročito u slučajevima kada se još svjež beton spušta pod more.

U tim slučajevima upotrebljava se portland otporan na sulfatnu agresiju, tj. portland C_3A do 8% i C_3S do 50%, ili još bolje uzeti sulfatno otporne pucolanske portland, ili portland-cemente s dodatkom zgure, supersulfatne ili metalurške cemente.

Pucolanski cementi i cementi s dodatkom zgure otporniji su i od otpornog portland-cementa. Aluminijski ili Lafargeov cement vrlo je otporan, ali s njim treba oprezno postupati, i skup je, pa se nerado upotrebljava.

Pri odluci o izboru vrlo je važno da je izabrani cement naročito finoga mliva, sposoban za stvaranje gelova koji nastaju za vrijeme hidratacije, te da se ne štedi na dozaži. Bez obzira kako otporan bio i koji smo cement izabrali, treba ga s dodatkom dozirati 400...450 kg/m³ betona.

Ugrađivanje pomorskog betona vršiti kontraktorom ili metodom prepakt, odnosno kolkret-betona.

Dijelove objekta koji su izloženi naizmjeničnom vlaženju i sušenju, a koji su najčešće izloženi i najjačim fizikalnim utjecanjima kao udarcima valova i slično, treba izraditi naročito pažljivo. Ako dolazi i do smrzavanja tih dijelova objekta otporniji je portland-cement izrađen za radove u moru od pucolanskog cementa ili cementa s dodatkom zgure. Iako su pucolanski cement i oni s dodatkom zgure otporniji na kemijsku agresiju u predjelima jakih valova i ostalih fizikalnih napada, kao brušenja od strujanja pijeska itd., odlučit ćemo se za onaj cement koji je otporniji na jaču agresiju. Budući da su u ovim slučajevima fizikalni napadi jači i opasniji od normalnih kemijskih napada morske vode, treba se odlučiti za cement koji je otporniji na fizikalne napade. Takav beton moramo nastojati ugrađivati vibratorima, dodavati mu aeranse radi prekidanja kapilara i uopće ga izvoditi što nepropusnijim.

Pri izboru agregata treba paziti da je agregat zdrav, otporan na djelovanje morske vode, da ne izaziva alkalno-agregatnu reakciju, da nije prašnjav, i da nema primjesa koje nepovoljno djeluju na kvalitet betona.

Na otpornost ugrađena betona utječu i vrsta, odnosno oblik zrnaca agregata, tj. da li su zrna zaobljena ili oštrobrida. O tome je bilo ranije govora, pa ovdje samo napominjem.

Granulometrijski sastav agregata treba da je takav da beton bude homogen, ugradiv, i da ne segregira. Ako je transport betona duži treba mu posvetiti naročitu pažnju da ne dođe do segregacije, odnosno odvajanja. Ako masa betona nije homogena sastava i obradiva lako dolazi do segregacije i pri samom ubacavanju betona u oplatu. Segregacija ugrađenog betona vrlo je opasna po nepropusnost, a time i otpornost betona, pa tome treba posvetiti osobitu pažnju. Ako se beton vibrira treba paziti da smjesa nema previše vode, jer i tada lako dolazi do segregacije. U slučajevima previše plastičnog betona treba izvršiti revibraciju. Da se spriječi segregacija dodaje se katkada više pijeska nego što je potrebno po granulometrijskoj liniji. Time beton postaje obradljiviji i teže segregira. Povećanju ugradljivosti i obradivosti, a time i sprečavanje segregacije, pomažu plastifikatori i aeransi, pa je dobro i njih pravilno koristiti.

Naročitu pažnju treba posvetiti pravilnom određivanju vodocementnog faktora, te strogoj kontroli dodavanja vode u određenoj količini. Pri tome treba voditi računa i o vlastitoj vlazi pijeska, i tu količinu vlage moramo za vrijeme rada često kontrolirati. Zanemarivanje vlastite vlage pijeska može jako izmjeniti vodocementni faktor i pokvariti kvalitet betona. Treba upamtiti da je prevelika dozaža vode greška istoga reda kao i premalo dodavanje cementa, pa tehnički nadzor mora ovim problemom posvetiti istu pažnju.

Vodocementni faktor ovisi o agregatu i granulometrijskom sastavu, o vrsti cementa, o dužini transporta, o načinu ugraživanja, te o masi presjeka betona, odnosno eventualnoj gustoći armature.

Na otpornost betona utječu također način i vrijeme mašinskog miješanja betona, te prikladno rješenje i dužina transporta od miješalice do mjesta ugradbe. Loše izabran način transportiranja za određenu i potrebnu konzistenciju betona ili neodgovarajuća konzistencija, koja je određena radi mogućnosti transporta, a ne odgovara potrebama ugradbe mogu učiniti, uza sav ostali mar i brigu da nam ugrađeni beton bude propustan i loš. Mase betona koje se ugrađuju kod pomorskih radova često su velike i betoniranje traje duže vremena, iako se betonira danonoćno, bez prekida, kao pri kontraktorskom ugrađivanju ili prepakt, odnosno kolkret-metodi. Kako kroz to vrijeme dolazi do promjene vanjske temperature, do promjene vlažnosti zraka, a često i do oborina, treba stalno i kontinuirano kontrolirati vlažnost pijeska i agregata, jer razlike vlažnosti mogu biti znatne i jako mijenjati vodocementni faktor.

Isto tako treba pratiti eventualne promjene granulometrijskog sastava agregata, budući da se radi o velikim deponijama kod kojih je na različitim dijelovima moglo doći do promjena veličine sastava zrnaca nastalih pri ubacivanju agregata u deponiju. Naravno da tu važnu ulogu igra izbor načina deponiranja agregata, tj. da li je on deponiran na hrpama, u silosima ili u posebnim separacijskim uređajima.

Glavni cilj kojemu moramo težiti jest izrada gustog, nepropusnog i otpornog betona. Takav je beton najbolja i jedina garancija da će nam objekat biti trajan, pa zato treba sve usmjeriti da to doista postignemo. Gust, neporozan i nepropustan beton daje veću sigurnost trajnosti nego izbor nešto manje ili više otpornog cementa, uz uslov da je dozaža veznog sredstva bogata i što finije mljevena. Kada je beton ugrađen treba mu i dalje posvećivati pažnju i njegovati ga, tj. vlažiti i štititi od vjetra i sunca, čim dulje. Ova njega, naročito u prvo vrijeme kada su stezanja betona najveća, mora da bude temeljito provedena, jer sav trud oko izrade nepropusnog betona nije od koristi ako nam beton popuca uslijed prebrzog sušenja i prejakog skupljanja.

Uza svu pažnju ipak se može dogoditi da mjestimice ne uspijemo izraditi takav beton, te da je zbog segregacije, loše ugradbe itd. ostao lokalno porozan. Takva mjesta treba odmah injektirati, a ako je defektno mjesto na suhu, i torkretiriti. Ovakovi ispravci popravljaju stanje, ali ih ipak treba izbjegavati, jer popravci nisu uvijek posve sigurni.

Već napadnuti stari betonski zid u dijelovima pod morem popravlja se prepakt ili kolkret-plombama i injiciranjem, a dijelovi na suhu injiciranjem i torkretiranjem.

Neuspjeli porozni beton teško je spasiti i popraviti. Uza sva nastojanja i održavanja njegov vijek trajanja neće biti dug, a ispravci su i skupi. Svi premazi i površinske zaštite samo su palijativne mjere kraćeg ili duljeg trajanja, pa njima treba pribjegavati jedino u izuzetnim slučajevima.

Osnovno je dakle kod radova u moru izvesti gust i nepropustan beton. To je vrlo težak i delikatan zadatak, ali uz maksimalnu kontrolu i zalaganje svih koji svjesno teže samo k tom zadatku može se izvršiti.

Na kraju još napominjem da beton u moru, iako je dobro uspio, treba i kasnije povremeno kontrolirati i pratiti njegovo ponašanje u vodi. Ukoliko se primjete i manja oštećenja mora se odmah pristupiti stručnom popravku, jer to je sigurnije i jeftinije nego čekati da beton posve propadne, pa tek onda pristupiti njegovoj asanaciji.

PROPISI ZA CEMENTE KOJI SE MOGU UPOTREBLJAVATI ZA POMORSKE RADOVE

Da se izbjegnu neorganiziranosti i poteškoće svakog gradilišta oko nabavke cementa otpornog za radove u moru, neophodno je potrebno da postoje propisi koji stanovite cemente priznaju kao otporne za takve radove. Napredne zemlje Evrope i Amerike imaju takove propise, pa bi trebalo i kod nas požuriti s njihovim izdavanjem i priznavanjem određenih cemenata kao otpornih u morskoj vodi. To bi olakšalo orjentaciju naših inženjera, a i pojeftinilo radove, jer bi se takav cement proizvodio planski i masovno, a ne da se pojedinačno traže potrebne recepture prema zahtjevima građevinara ili kemičara same cementare. Osim toga ne može se tako važan problem prepustiti odlučivanju pojedinca, već treba da postoje stručno propisane garancije da će isporučeni cement doista dati traženu otpornost.

U nekim zemljama, npr. u Francuskoj, postoje dvije vrste ispitivanja, i to dugotrajna i ubrzana.

Ispitivanja dugotrajnim postupkom daju svakako realniju sliku vladanja betona u moru, ali kako taj postupak traje 10 godina do priznanja nekog cementa, dužina roka čini mnoge poteškoće. Tvornica kroz period od 10 godina modernizacijom mijenja način proizvodnje i vrši poboljšanja sastava cementa, pa kada primi pozitivan atest on za nju nije više aktuelan, što znači kočenje napretka i produkcije. Ubrzane postupke vršili su u prvo vrijeme različiti autori na mnoge načine. Jedni su svoja ispitivanja bazirali na ubrzanoj koroziji cementa. Drugi su cementna pokusna tijela uronjavali u rastvore jakih koncentracija soli, daleko jačih od onih u moru, te uspoređivanjem vladanja i otpornosti pokusnih tijela donosili stanovite zaključke. Neki su opet, da ubrzaju proces korozije, povisivali temperaturu rastvora, a neki su intenzivnom filtracijom rastvora u pokusna tijela nastojali ubrzati koroziju.

Svi ti pokušaji nisu doveli do željenih rezultata, jer svi su se previše udaljili od prirodnih uslova, pa pravilne analogije nije moglo ni biti.

Osim toga velika većina ispitivača istraživala je otpornost samog cementa. Nas građevinare u krajnjoj liniji ipak najviše interesira otpornost betona izrađenog s odgovarajućim cementom.

Danas je prihvaćen kriterij ispitivanja mehaničke čvrstoće, jer kako već znamo, postoji paralelna ovisnost čvrstoće i otpornosti betona. Jasno je da beton koji je napadnut npr. kemijskom agresijom morske vode odmah gubi i na čvrstoći, odnosno ako mu se čvrstoća ne mijenja, ni rezultati agresije ne mogu biti nikakvi. Ovdje se ne smije uspoređivati čvrstoća korodiranog uzorka s čvrstoćom uzoraka prije početka korozije ili marki betona i

tome slično. Čvrstoća betona koji se ispituje može rasti ili padati za vrijeme trajanja ispitivanja, pa bi nas to dovelo do pogrešnih zaključaka. Kada se pokusno tijelo meće u morsku vodu ili neki umjetni rastvor, paralelno se isto takovo pokusno tijelo, izrađeno od istog betona, meće u vodu i pusti da u vodi i rastvoru jednako vrijeme stvrdnjava.

Ustanovljenje koeficienta otpornosti vrši se tako da se izračuna odnos čvrstoće pokusnog tijela uronjenog u more ili rastvor naprama čvrstoći tijela uronjenog u vodu.

Rok koliko se pokusno tijelo drži u rastvoru nije svagdje jednako fiksiran. Danas se taj rok uzima najviše 6 mjeseci.

Prema francuskim propisima umjetna morska voda mora da ima ovaj sastav:

1000	g	destilirane vode
30	g	natrijeva klorida
5	g	magnezijeva sulfata
6	g	kristalnog magnezijevog klorida
1,5	g	hidratiziranog kalcijevog sulfata
0,2	g	kalcijeva bikarbonata

Voda treba stalno da ima temperaturu $+20^0C \pm 0{,}2^0C$, te da se svaka dva mjeseca obnavlja.

SAD ne propisuju dugotrajna ispitivanja, dovoljni su rezultati ubrzanog postupka, pri čemu su najmjerodavnija ispitivanja čvrstoće, kemijske analize i stalnosti volumena.

Američki propisi određuju slijedeći kemijski sastav za portland-cement II, koji se smatra prikladnim i za radove u moru:

	maksimalni postotak
3 $CaOAl_2O_3$	8%
3 $CaOSiO_2$	50%
Al_2O_3	6%
Fe_2O_3	6%
MgO	5%
SO_3	2%
gubitak na žarenju	3%
neotopljivi ostatak	0,75%

Naravno da to nisu sva ograničenja i uslovi koji se u SAD-u postavljaju na cement. Treba izvršiti još čitav niz daljnjih ispitivanja da se može utvrditi otpornost.

Predaleko bi nas odvelo da navodim sva ta ispitivanja, ali sam želio da ova pitanja barem u principu potaknem, kako bi se što skorije i kod nas pristupilo donošenju spomenutih propisa.

UPOTREBLJENA LITERATURA

M. Duriez: *Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments.* Travaux, 1953.

V. V. Kind: *Korozija cemenata i betona u hidrotehničkim objektima.*

OGLASNI DIO

rijeka-projekt

Rijeka, M. Albaharija 10a
Telefoni: 22-888, 22-386

Projektira:

Luke
Brodogradilišta
Hidrotehničke objekte
Industrijske objekte
Privredne i stambene objekte
Mostove i saobraćajnice
Energetska postrojenja

Projektira
sve vrsti
visokogradnje
i niskogradnje

Građevno - projektni zavod, Rijeka

Istarska 6.
Tel. 22-271.

KONSTRUKCIONI BIRO
GRAĐEVINSKE INDUSTRIJE

ZAGREB,
Prilaz JNA 30

Telefoni: 32-782, 32-800, 26-016, 24-619

Projektira i konstruira kompletnu opremu za tvornice cementa; tvornice grube keramike, opeke i crijepa; tvornice sadre i krečane. Preuzima nadzor izvedbe montaže i tehničke savjetovanja. Vrši analize sirovina u vlastitom kemijskom laboratoriju.

POSLOVNO UDRUŽENJE ZA INVESTICIONU IZGRADNJU U INOSTRANSTVU, BEOGRAD, TAKOVSKA 6/II

»JUGOINVEST« je jedno od najvećih poslovnih udruženja u zemlji, koje se specijalizovalo za izvođenje svih investicionih radova iz oblasti građevinarstva.

»JUGOINVEST« je ovlašćen da za račun svojih članova preuzima najrazličitije radove s područja specijalizacije svojih članova: hidrogradnje, melioracije, visokogradnje i niskogradnje, geološko-istražnih i sondažnih radova, studija, projektovanja i nadzor svih vrsta radova itd. Ovu raznovrsnost radova obezbeđuje mu 27 članova — privrednih organizacija: građevinskih, montažnih i projektnih organizacija, te instituta, koji raspolažu najsavremenijim tehničkim kadrovima i ostvaruju bruto produkt preko 86 milijardi dinara.

Članovi »JUGOINVESTA« stekli su velik ugled svojim radom na izgradnji u našoj zemlji. Od niza kapitalnih objekata, pomenućemo samo nekoliko, koji po svojoj veličini, kvalitetu izgradnje i raznovrsnosti namene, privlače najveću pažnju:

— 3.000 km modernih puteva
— 6.500 km železničkih pruga
— preko 15 km mostova i sličnih objekata
— hidrocentrala »JABLANICA«, »JAJCE I i II«, Bogatić
— termoelektrana »KAKANJ«
— betonska brana »Liverovići«
— fabrika: »IVO-LOLA RIBAR« u Željezniku, fabrika viskoze u Loznici, fabrika cementa Novi Popovac itd.
— zgrada Saveznog izvršnog veća u Novom Beogradu; hale Beogradskog sajma,
— stadion JNA u Beogradu, itd.

Osim navedenih objekata izgradnje, članovi »JUGOINVESTA« izradili su mnoštvo projekata iz svih oblasti projektovanja i sa najrazličitijim rešenjima. Tako je »JUGOPROJEKT« projektovao: Fabriku moto-delova, Kragujevac, sistem HE »IBAR«, put u Đerdapu, itd.; «HIDROPROJEKAT«, Beograd: betonske brane Glažanj, Lipkovo i Brestovačku; sisteme za navodnjavanje: Dečanski, Turija, itd.; vodovode i kanalizacije za veće gradove u Srbiji; fabrike: sapuna u Novom Sadu, el. opreme u Zemunu, servisne stanice, postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda, saobraćajnice sa svim objektima na sistemu »ĐERDAP«, itd.

»SRBIJA-PROJEKT«, Beograd: Fabrika cementa, Novi Popovac; Fabrika »MAGNOHROM«, Kraljevo; Bolnica za TBC, Beograd; poslovna zgrada elektrodistributivnog preduzeća, Beograd; klanice sa hladnjačom u Skoplju, Ljubljani, Paćinskoj Skeli; Fabrika stakla u Skoplju, zgrada Saveznog izvršnog veća, Beograd, itd., itd.

Inostrani investitori su zapazili izrađene objekte u zemlji i poverili članovima »JUGOINVESTA« izgradnju sličnih objekata u svojim zemljama.

Tako su članovi »JUGOINVESTA« do sada izgradili ili grade:

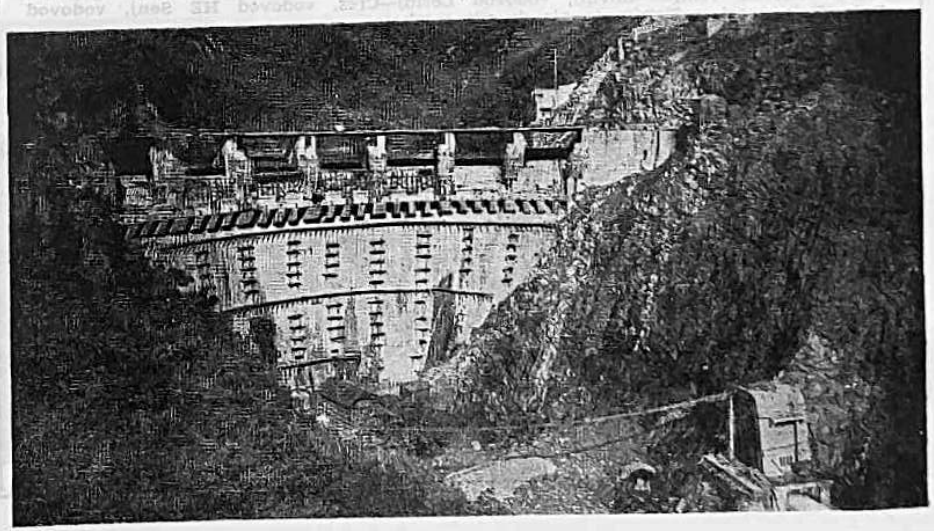
U TURSKOJ — 1020 radničkih stanova u rudarskom bazenu Zonguldak, sedam armirano-betonskih mostova kod Rašadija na reci Nixoru, pet mostova u okolini Istanbula, zgradu osiguravajućeg društva u Istanbulu. U SIRIJI — članovi »JUGOINVESTA« su radili na prvoj fazi regulacije reke Oronto. U LIBANU — »JUGOINVEST« je preko svog člana »HIDROGRADNJE«, Sarajevo, izradilo tunel Markabi za HE Karaoun, na kojoj sada izvodi završne radove. Član »JUGOINVESTA«, »GEOISTRAGE«, Sarajevo radi tamo na geološko-istražnim i sondažnim radovima. U JORDANU — član »JUGOINVESTA« »RAD«, radi na podizanju fabrike betonskih cevi potrebnih za izgradnju kanalizacije grada Ammana. U IRAKU — februara 1964. godine treba da počnu radovi »MOSTOGRADNJE«, Beograd, na izgradnji mosta Fallujah u blizini Bagdada. U INDIJI — »JUGOINVEST« je za račun svog člana »IVAN MILUTINOVIĆ«, Beograd, zaključio ugovor o isušenju Slanih jezera kod Kalkute i svi radovi teku na zadovoljstvo investitora. U BURMI isti izvođač gradi brodogradilište Rangoon, u Indoneziji — brodogradilište Džakarta, dok je završena izgradnja brodogradilišta Akyab u Burmi. Uskoro treba da počnu radovi na bagerovanju u luci Paradeep. U TUNISU član »JUGOINVESTA« preduzeće »IVAN MILUTINOVIĆ« treba da počne radove na izgradnji spoljne luke La Goulette. Ovde treba pomenuti i niz projekata i studija koje su za inostranstvo izradili članovi »JUGOINVESTA«.

Tako je, na primer »JUGOPROJEKT« izradio četiri studije i projekte za Fabriku raznih namena i radio-odašiljač u Etiopiji, itd.

Niz ostalih završenih objekata nismo nabrojali. Takođe, ovde ne iznosimo niz krupnih objekata za koje je već očevidno da će biti povereni »JUGOINVESTU« i njegovim članovima, u raznim zemljama Afrike i Azije.
U članstvu »JUGOINVESTA« je i preduzeće »INVEST-IMPORT«, Beograd, koje — kao izvoznik opreme — istu može obezbediti za sve vrste objekata koje izgrađuju članovi »JUGOINVESTA«.

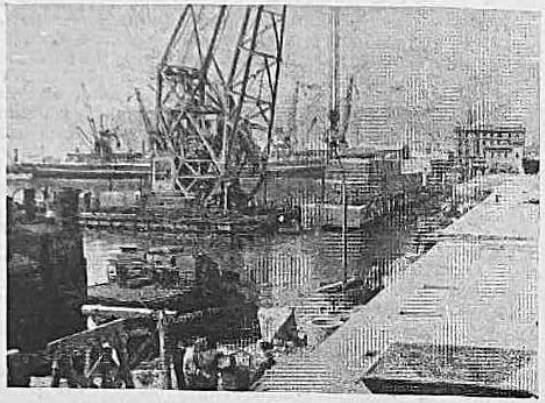
Široko razgranata mreža delegata po zemljama Afrike i Azije, omogućuju »JUGOINVESTU« kontakt s investitorima te obezbeđenje podataka za obrade poslova za svoje članove, koji su spremni da raspoložive kapacitete mobilišu za izvođenje investicionih radova u inostranstvu.

Samo u 1963. godini zaključeni su ugovori za radove na 9 krupnih objekata u vrednosti preko 25 miliona dolara. Sa ranije zaključenim ugovorima među kojima ima i takvih gde su rokovi izgradnje po 5 i više godina. Sada članovi »JUGOINVESTA« izvode radove koji prelaze vrednost od 50 miliona dolara.



Konstruktor

GRAĐEVINSKO PODUZEĆE — RIJEKA
ULICA PROLETERSKIH BRIGADA BROJ 11



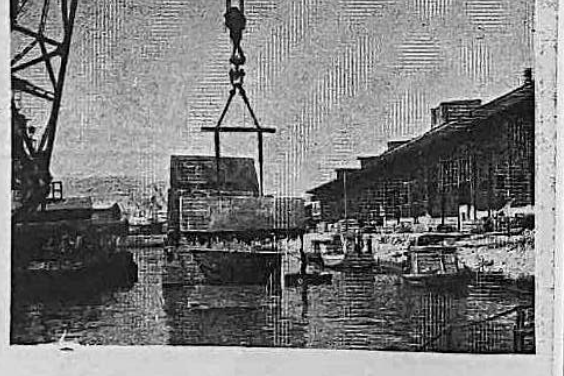
Specijalizirano poduzeće za izvođenje građevinskih radova pod vodom: izgradnja luka, lučkih postrojenja i drugih građevinskih radova vodogradevnog smjera: vodovodi, melioracije, regulacije rijeka i dr.

Za izvođenje ovih vrsta radova posjeduje potrebne strojeve i uređaje. Vlastiti plovni i vozni park.

Od pomorskih objekata do sada izvelo cjelokupnu obnovu riječke luke, lučkih objekata u Puli, Umagu, Kopru, Izoli, Poreču, Bakru, kao i svih drugih luka na području sjevernog Jadrana.

U inozemstvu izvršilo radove na obnovi Jugoslavenske slobodne zone u Solunu.

Od drugih radova vodogradevnog smjera poduzeće je izvelo radove: na kanalu Dunav—Tisa—Dunav, na regulaciji rijeke Mirne i Dragonje, na regulaciji Lonjskog polja, zatim vodovod Višnjan—Rovinj, vodovod Lošinj—Cres, vodovod HE Senj, vodovod Raša—Pula, most u Slunju, te niz drugih objekata.



„U L J A N I K"

BRODOGRADILIŠTE I
TVORNICA DIZEL - MOTORA

PULA — Rade Končara ul. br. 1
Tel. adresa: Uljanik — Pula

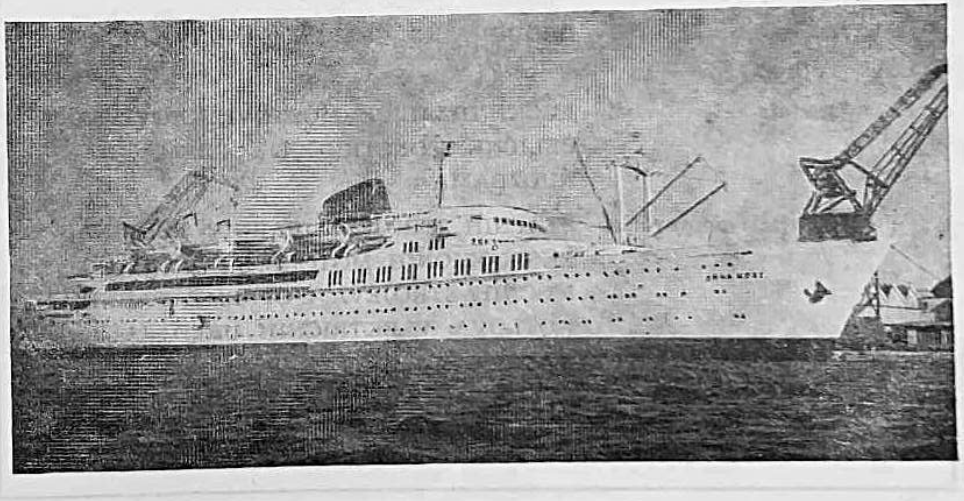
Telefon: 23-22 — Telex: 02721, 02722

— Projektira i gradi sve vrste brodova najviše klase do 50.000 DWT

— Vrši popravke i dokovanja brodova

— Proizvodi brodske i stacionarne dizel-motore po licenciji »Burmeister & Wain« — Copenhagen

— Izrađuje elektromotore za pogon brodskog teretnog vitla, elektro- i dizel-agregate za zavarivanje, te rasvjetne dizel-generatore.



BRODOGRADILIŠTE

VIKTOR LENAC

Rijeka, Lukobran Petra Drapšina 4
Telefoni: 23-504, 505, 506, 507 i 22-932
Pogon Martinšćica — Telefon 41-481

Remonti	— BRODOVI SVIH VRSTA I VELIČINA, NAROČITO REKLASIFIKACIJE NA REKONSTRUKCIJE
Specijalnosti	— HITNI POPRAVCI BRODOVA NA LUČKIM OPERACIJAMA
Oprema	— IZGRADNJA PRVORAZREDNOG BRODSKOG NAMJEŠTAJA, OPREMA BRODSKIH PROSTORIJA, DRVENIH PALUBA, ŽITNIH PREGRADA itd.
Dokovanje	— BRODOVA NA VLASTITOM PLIVAJUĆEM DOKU
Gradnja	— LUČKE DIZALICE, MOSTOVI, KROVIŠTA, ČELIČNE KONSTRUKCIJE PREMA NARUDŽBAMA
Revizije i popravci	— STAPNIH STROJEVA, PARNIH TURBINA, EKSPLOZIONIH MOTORA, OSTALIH POMOĆNIH STROJEVA I OPREME, PARNIH KOTLOVA, ELEKTRIČNIH UREĐAJA itd.
Specijalna gradnja	— SPORTSKIH ČAMACA I JEDRILICA PO NARUDŽBI

Znak: 330 P

Izdanje:

Ing. LEO BABIĆ, direktor Rijeka-projekta,
Ulica Moše Albaharija 10/a, Rijeka

PRIMJENA BETONA KOD RADOVA U MORU

Izdavač:

TEHNIČKA KNJIGA, izdavačko poduzeće
Zagreb, Jurišićeva 10

Za izdavača odgovara:
Ing. Kuzman Ražnjević

Uredništvo priručnika:

Glavni urednik:
Zvonimir Vistrička

Urednik edicije:
Josip Živković

Jezična recenzija:
Zvonimir Veljačić

Tehnički urednik:
Žarko Pavunić

Korigirao:
Autor

Tisak:
Izdavačko-štamparsko preduzeće »Obod« — Cetinje

Tisak dovršen:
Veljača 1964.